

PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

(11)Publication number : 2003-297727

(43)Date of publication of application : 17.10.2003

(51)Int.Cl.

H01L 21/027

G02B 19/00

G03F 7/20

(21)Application number : 2002-100852

(71)Applicant : NIKON CORP

(22)Date of filing : 03.04.2002

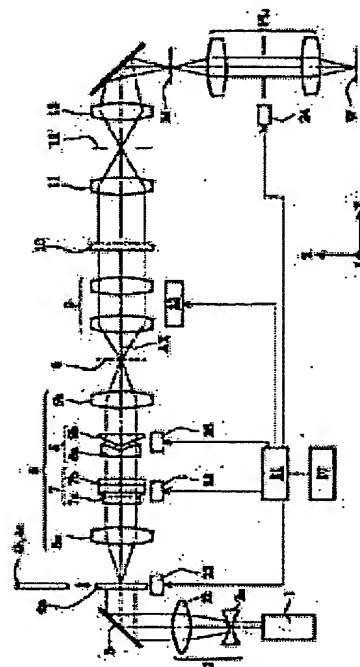
(72)Inventor : KANAYAMATANI NOBUMICHI

(54) ILLUMINATION OPTICAL DEVICE, EXPOSURE APPARATUS, AND METHOD OF EXPOSURE

(57)Abstract:

PROBLEM TO BE SOLVED: To provide an illumination optical device achieving illuminating conditions which are different in two intersecting directions on an emitted surface.

SOLUTION: The illumination optical device comprises a first axicon system (7) which is disposed in an optical path between a light source means (1) and an optical integrator (10) and a second axicon system (8) which is disposed in an optical path between the first axicon system and the optical integrator. The first axicon system has a first prism (7a) which moves at least along the optical axis, and a second prism (7b) which is fixed along the optical axis in this order starting from the side of the light source means. The second axicon system has a third prism (8a) which is fixed at least along the optical axis, and a fourth prism (8b) which moves along the optical axis in this order starting from the side of the light source means.



(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号

特開2003-297727

(P2003-297727A)

(43) 公開日 平成15年10月17日 (2003. 10. 17)

(51) Int.Cl. ⁷	識別記号	F I	テームト* (参考)
H 0 1 L 21/027		G 0 2 B 19/00	2 H 0 5 2
G 0 2 B 19/00		G 0 3 F 7/20	5 0 2 2 H 0 9 7
G 0 3 F 7/20	5 0 2	H 0 1 L 21/30	5 1 5 D 5 F 0 4 6

審査請求 未請求 請求項の数18 O L (全 23 頁)

(21) 出願番号 特願2002-100852(P2002-100852)

(22) 出願日 平成14年4月3日 (2002. 4. 3)

(71) 出願人 000004112

株式会社ニコン

東京都千代田区丸の内3丁目2番3号

(72) 発明者 金山谷 信道

東京都千代田区丸の内3丁目2番3号 株式会社ニコン内

(74) 代理人 100095256

弁理士 山口 孝雄

F ターム (参考) 2H052 BA02 BA03 BA07 BA12

2H097 CA13 CB00 LA10

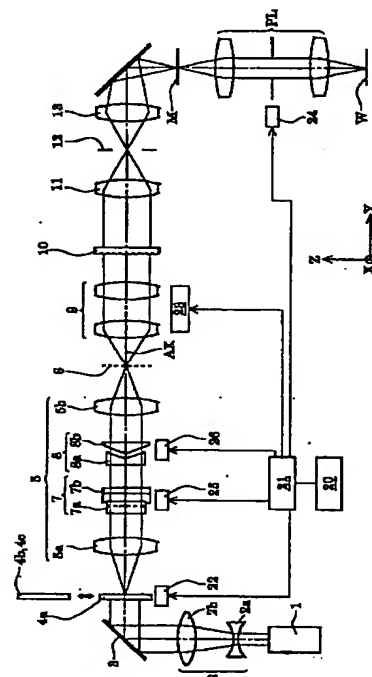
5F046 BA04 CA07 CB10 CB13 CB23

(54) 【発明の名称】 照明光学装置、露光装置および露光方法

(57) 【要約】

【課題】 被照射面上の直交する二方向で互いに異なる照明条件を実現することのできる照明光学装置。

【解決手段】 光源手段 (1) とオプティカルインテグレータ (10) との間の光路中に配置された第1アキシコン系 (7) と、第1アキシコン系とオプティカルインテグレータとの間の光路中に配置された第2アキシコン系 (8) とを備えている。第1アキシコン系は、光源手段側から順に、少なくとも光軸に沿って移動可能に構成された第1プリズム (7a) と、光軸に沿って固定された第2プリズム (7b) とを有する。第2アキシコン系は、光源手段側から順に、少なくとも光軸に沿って固定された第3プリズム (8a) と、光軸に沿って移動可能に構成された第4プリズム (8b) とを有する。



【特許請求の範囲】

【請求項1】 光源手段からの光束に基づいて二次光源を形成するためのオブティカルインテグレータと、該オブティカルインテグレータからの光束を被照射面へ導くための導光光学系とを備えた照明光学装置において、前記光源手段と前記オブティカルインテグレータとの間の光路中に配置され、前記オブティカルインテグレータへの入射光束の入射角度と入射位置との少なくとも一方を変化させるための第1アキシコン系と、前記第1アキシコン系と前記オブティカルインテグレータとの間の光路中に配置され、前記オブティカルインテグレータへの入射光束の入射角度と入射位置との少なくとも一方を変化させるための第2アキシコン系とを備え、

前記第1アキシコン系は、前記光源手段側から順に、少なくとも光軸に沿って移動可能に構成された第1プリズムと、光軸に沿って固定され且つ前記第1プリズムの屈折面と相補的に形成された屈折面を有する第2プリズムとを有し、

前記第2アキシコン系は、前記光源手段側から順に、少なくとも光軸に沿って固定された第3プリズムと、光軸に沿って移動可能に構成され且つ前記第3プリズムの屈折面と相補的に形成された屈折面を有する第4プリズムとを有することを特徴とする照明光学装置。

【請求項2】 前記第2プリズムと前記第3プリズムとは一体的に形成されていることを特徴とする請求項1に記載の照明光学装置。

【請求項3】 前記第1プリズムは凹状断面の屈折面を有し、前記第2プリズムは前記第1プリズムの前記凹状断面の屈折面と相補的に形成された凸状断面の屈折面を有し、前記第3プリズムは凹状断面の屈折面を有し、前記第4プリズムは前記第3プリズムの前記凹状断面の屈折面と相補的に形成された凸状断面の屈折面を有することを特徴とする請求項1または2に記載の照明光学装置。

【請求項4】 前記第1プリズムは、光軸と直交する第1方向に沿って稜線を有するV字状の屈折面を有し、前記第1プリズムは、光軸および前記第1方向と直交する第2方向に沿って稜線を有するV字状の屈折面を有することを特徴とする請求項3に記載の照明光学装置。

【請求項5】 前記第1プリズムおよび前記第3プリズムの一方は、光軸を中心とする円錐状の屈折面を有し、前記第1プリズムおよび前記第3プリズムの他方は、光軸と直交する方向に沿って稜線を有するV字状の屈折面を有することを特徴とする請求項3に記載の照明光学装置。

【請求項6】 光源手段からの光束に基づいて二次光源を形成するためのオブティカルインテグレータと、前記オブティカルインテグレータからの光束を被照射面へ導くための導光光学系と、

前記光源手段と前記オブティカルインテグレータとの間の光路中に配置され、前記オブティカルインテグレータへの入射光束の入射角度と入射位置との少なくとも一方を変化させるためのアキシコン系とを備え、

前記アキシコン系は、円錐状またはV字状の凹状断面の屈折面を有する第1プリズムと、該第1プリズムの屈折面と相補的に形成された円錐状またはV字状の凸状断面の屈折面を有する第2プリズムとを有し、

前記アキシコン系は、照明瞳の近傍において前記円錐状の屈折面の頂点に対応して形成される円形状の影領域の直径または前記V字状の屈折面の稜線に対応して形成される直線状の影領域の幅が光束全体の大きさの1/10以下にするための所要の形状および特性を有することを特徴とする照明光学装置。

【請求項7】 前記光源手段からの光束を所定の断面形状を有する光束または所定の光強度分布を有する光束に変換するための光束変換素子と、

前記光束変換素子と前記オブティカルインテグレータとの間の光路中に配置された第1光学系と、

前記第1光学系と前記オブティカルインテグレータとの間の光路中に配置された第2光学系とをさらに備え、

前記アキシコン系は、前記第1光学系の光路中において前記照明瞳の近傍に配置されていることを特徴とする請求項6に記載の照明光学装置。

【請求項8】 前記光束変換素子としての回折光学素子の最大回折角を ϕ_{\max} とし、前記第1プリズムの屈折面と前記第2プリズムの屈折面との光軸に沿った間隔をLとし、前記円錐状の屈折面の頂角または前記V字状の屈折面の交差角を 2θ とし、前記第1プリズムおよび前記第2プリズムを形成する光学材料の前記光束に対する屈折率をnとし、前記第1光学系のうちの前記アキシコン系よりも前記光源手段側に配置された第1レンズ群の焦点距離を f_1 としたとき、

$$AL \leq (f_1 \times \sin \phi_{\max}) / 10$$

ただし、

$$A = (\tan \alpha \times \tan \theta) / (\tan \theta - \tan \alpha)$$

$$\alpha = \sin^{-1}(n \times \cos \theta) + \theta - 90 \text{ (単位: 度)}$$

の条件を満足することを特徴とする請求項7に記載の照明光学装置。

【請求項9】 光源手段からの光束に基づいて二次光源を形成するためのオブティカルインテグレータと、前記オブティカルインテグレータからの光束を被照射面へ導くための導光光学系と、

前記光源手段と前記オブティカルインテグレータとの間の光路中に配置され、前記オブティカルインテグレータへの入射光束の入射角度と入射位置との少なくとも一方を変化させるための蛍石で形成されたアキシコン系とを備えていることを特徴とする照明光学装置。

【請求項10】 前記光源手段は、200nm以下の波長を有する光を供給することを特徴とする請求項9に記載

載の照明光学装置。

【請求項 1 1】 前記アキシコン系は、光軸と直交する方向に沿って稜線を有する V 字状の凹状断面の屈折面を有する第 1 プリズムと、前記第 1 プリズムの前記凹状断面の屈折面と相補的に形成された V 字状の凸状断面の屈折面を有する第 2 プリズムとを有し、前記第 1 プリズムは、光軸と前記稜線とを含む面に沿って分割されていることを特徴とする請求項 9 または 1 0 に記載の照明光学装置。

【請求項 1 2】 光源手段からの光束に基づいて被照射面を照明する照明光学装置において、所定の方向に沿って稜線を有する V 字状の凹状断面の屈折面を有するプリズムを備え、前記プリズムは、前記稜線を含む所定の面に沿って分割されていることを特徴とする照明光学装置。

【請求項 1 3】 前記光源手段からの光束に基づいて二次光源を形成するためのオブティカルインテグレータと、前記オブティカルインテグレータからの光束を前記被照射面へ導くための導光光学系と、前記光源手段と前記オブティカルインテグレータとの間の光路中に配置され、前記オブティカルインテグレータへの入射光束の入射角度と入射位置との少なくとも一方を変化させるための前記プリズムを含むアキシコン系とをさらに備えていることを特徴とする請求項 1 2 に記載の照明光学装置。

【請求項 1 4】 前記アキシコン系は、光軸と直交する方向に沿って前記稜線を有する V 字状の凹状断面の屈折面を有する前記プリズムと、前記プリズムの前記凹状断面の屈折面と相補的に形成された V 字状の凸状断面の屈折面を有する第 2 プリズムとを有し、前記プリズムは光軸と前記稜線とを含む面に沿って分割されていることを特徴とする請求項 1 3 に記載の照明光学装置。

【請求項 1 5】 被照射面を照明する照明光学装置において、光源手段からの光束に基づいて 4 極状の光強度分布を有する二次光源を照明瞳面に形成するために、前記光源手段からの光束を 4 つの光束に変換するための光束変換素子と、前記光束変換素子と前記照明瞳面との間の光路中に配置されて、前記二次光源を構成する 4 つの実質的な面光源のうちの一方の一对と他方の一对とを光軸を挟んで対称的に移動させるためのアキシコン系とを備え、前記光束変換素子は、光軸と直交する第 1 方向に沿って細長く延びた長方形の各隅点を中心として前記 4 つの実質的な面光源の各々を形成することを特徴とする照明光学装置。

【請求項 1 6】 前記アキシコン系は、前記第 1 方向に沿って稜線を有する V 字状の凹状断面の屈折面を有する第 1 プリズムと、前記第 1 プリズムの前記凹状断面の屈

折面と相補的に形成された V 字状の凸状断面の屈折面を有する第 2 プリズムとを有する第 1 アキシコン系と、光軸および前記第 1 方向と直交する第 2 方向に沿って稜線を有する V 字状の凹状断面の屈折面を有する第 3 プリズムと、前記第 3 プリズムの前記凹状断面の屈折面と相補的に形成された V 字状の凸状断面の屈折面を有する第 4 プリズムとを有する第 2 アキシコン系とを有することを特徴とする請求項 1 5 に記載の照明光学装置。

【請求項 1 7】 請求項 1 乃至 1 6 のいずれか 1 項に記載の照明光学装置と、前記被照射面に配置されたマスクのパターンを感光性基板に投影露光するための投影光学系とを備えていることを特徴とする露光装置。

【請求項 1 8】 請求項 1 乃至 1 6 のいずれか 1 項に記載の照明光学装置を介してマスクを照明し、照明された前記マスクに形成されたパターンの像を感光性基板上に投影露光することを特徴とする露光方法。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は照明光学装置および該照明光学装置を備えた露光装置に関し、特に半導体素子、撮像素子、液晶表示素子、薄膜磁気ヘッド等のマイクロデバイスをリソグラフィ工程で製造するための露光装置に好適な照明光学装置に関する。

【0002】

【従来の技術】この種の典型的な露光装置においては、光源から射出された光束が、オブティカルインテグレータとしてのフライアイレンズを介して、多数の光源からなる実質的な面光源としての二次光源を形成する。二次光源からの光束は、フライアイレンズの後側焦点面の近傍に配置された開口絞りを介して制限された後、コンデンサーレンズに入射する。

【0003】コンデンサーレンズにより集光された光束は、所定のパターンが形成されたマスクを重疊的に照明する。マスクのパターンを透過した光は、投影光学系を介してウェハ上に結像する。こうして、ウェハ上には、マスクパターンが投影露光（転写）される。なお、マスクに形成されたパターンは高集積化されており、この微細パターンをウェハ上に正確に転写するにはウェハ上において均一な照度分布を得ることが不可欠である。

【0004】

【発明が解決しようとする課題】そこで、フライアイレンズの後側焦点面に円形状の二次光源を形成し、その大きさを変化させて照明のコヒーレンシ σ （ σ 値＝開口絞り径／投影光学系の瞳径、あるいは σ 値＝照明光学系の射出側開口数／投影光学系の入射側開口数）を変化させる技術が注目されている。また、フライアイレンズの後側焦点面に輪帯状や 4 極状の二次光源を形成し、投影光学系の焦点深度や解像力を向上させる技術が注目されている。

【0005】しかしながら、上述のような従来技術で

は、円形状の二次光源に基づく通常の円形照明の場合も、輪帯状や4極状の二次光源に基づく変形照明（輪帯照明や4極照明）の場合も、被照射面であるマスク上の一点に入射する光束の断面形状がマスク上の直交する二方向に関して同じ位置関係にある。換言すると、従来技術では、被照射面上の直交する二方向で照明条件が同じである。その結果、マスクパターンに方向性がある場合、マスク上の直交する二方向で最適な照明条件を実現することができない。

【0006】本発明は、前述の課題に鑑みてなされたものであり、被照射面上の直交する二方向で互いに異なる照明条件を実現することのできる照明光学装置を提供することを目的とする。また、本発明は、被照射面上の直交する二方向で互いに異なる照明条件を実現することのできる照明光学装置を用いて、パターンに方向性があるマスク上の直交する二方向で最適な照明条件を設定することのできる露光装置および露光方法を提供することを目的とする。

【0007】

【課題を解決するための手段】前記課題を解決するために、本発明の第1発明では、光源手段からの光束に基づいて二次光源を形成するためのオブティカルインテグレートと、該オブティカルインテグレートからの光束を被照射面へ導くための導光光学系とを備えた照明光学装置において、前記光源手段と前記オブティカルインテグレートとの間の光路中に配置され、前記オブティカルインテグレートへの入射光束の入射角度と入射位置との少なくとも一方を変化させるための第1アキシコン系と、前記第1アキシコン系と前記オブティカルインテグレートとの間の光路中に配置され、前記オブティカルインテグレートへの入射光束の入射角度と入射位置との少なくとも一方を変化させるための第2アキシコン系とを備え、前記第1アキシコン系は、前記光源手段側から順に、少なくとも光軸に沿って移動可能に構成された第1プリズムと、光軸に沿って固定され且つ前記第1プリズムの屈折面と相補的に形成された屈折面を有する第2プリズムとを有し、前記第2アキシコン系は、前記光源手段側から順に、少なくとも光軸に沿って固定された第3プリズムと、光軸に沿って移動可能に構成され且つ前記第3プリズムの屈折面と相補的に形成された屈折面を有する第4プリズムとを有することを特徴とする照明光学装置を提供する。この場合、前記第2プリズムは固定され、且つ前記第3プリズムは固定されていることが好ましい。

【0008】第1発明の好ましい態様によれば、前記第2プリズムと前記第3プリズムとは一体的に形成されている。また、前記第1プリズムは凹状断面の屈折面を有し、前記第2プリズムは前記第1プリズムの前記凹状断面の屈折面と相補的に形成された凸状断面の屈折面を有し、前記第3プリズムは凹状断面の屈折面を有し、前記第4プリズムは前記第3プリズムの前記凹状断面の屈折

面と相補的に形成された凸状断面の屈折面を有することが好ましい。

【0009】この場合、前記第1プリズムは、光軸と直交する第1方向に沿って稜線を有するV字状の屈折面を有し、前記第1プリズムは、光軸および前記第1方向と直交する第2方向に沿って稜線を有するV字状の屈折面を有することが好ましい。あるいは、前記第1プリズムおよび前記第3プリズムの一方は、光軸を中心とする円錐状の屈折面を有し、前記第1プリズムおよび前記第3プリズムの他方は、光軸と直交する方向に沿って稜線を有するV字状の屈折面を有することが好ましい。

【0010】本発明の第2発明では、光源手段からの光束に基づいて二次光源を形成するためのオブティカルインテグレートと、前記オブティカルインテグレートからの光束を被照射面へ導くための導光光学系と、前記光源手段と前記オブティカルインテグレートとの間の光路中に配置され、前記オブティカルインテグレートへの入射光束の入射角度と入射位置との少なくとも一方を変化させるためのアキシコン系とを備え、前記アキシコン系は、円錐状またはV字状の凹状断面の屈折面を有する第1プリズムと、該第1プリズムの屈折面と相補的に形成された円錐状またはV字状の凸状断面の屈折面を有する第2プリズムとを有し、前記アキシコン系は、照明瞳の近傍において前記円錐状の屈折面の頂点に対応して形成される円形状の影領域の直径または前記V字状の屈折面の稜線に対応して形成される直線状の影領域の幅が光束全体の大きさの $1/10$ 以下にするための所要の形状および特性を有することを特徴とする照明光学装置を提供する。

【0011】第2発明の好ましい態様によれば、前記光源手段からの光束を所定の断面形状を有する光束または所定の光強度分布を有する光束に変換するための光束変換素子と、前記光束変換素子と前記オブティカルインテグレートとの間の光路中に配置された第1光学系と、前記第1光学系と前記オブティカルインテグレートとの間の光路中に配置された第2光学系とをさらに備え、前記アキシコン系は、前記第1光学系の光路中において前記照明瞳の近傍に配置されている。

【0012】この場合、前記光束変換素子としての回折光学素子の最大回折角を ϕ_{\max} とし、前記第1プリズムの屈折面と前記第2プリズムの屈折面との光軸に沿った間隔を L とし、前記円錐状の屈折面の頂角または前記V字状の屈折面の交差角を 2θ とし、前記第1プリズムおよび前記第2プリズムを形成する光学材料の前記光束に対する屈折率を n とし、前記第1光学系のうちの前記アキシコン系よりも前記光源手段側に配置された第1レンズ群の焦点距離を f_1 としたとき、

$$AL \leq (f_1 \times \sin \phi_{\max}) / 10$$

ただし、

$$A = (\tan \alpha \times \tan \theta) / (\tan \theta - \tan \alpha)$$

$\alpha = \sin^{-1}(n \times \cos \theta) + \theta - 90$ (単位: 度)
の条件を満足することが好ましい。

【0013】本発明の第3発明では、光源手段からの光束に基づいて二次光源を形成するためのオプティカルインテグレータと、前記オプティカルインテグレータからの光束を被照射面へ導くための導光光学系と、前記光源手段と前記オプティカルインテグレータとの間の光路中に配置され、前記オプティカルインテグレータへの入射光束の入射角度と入射位置との少なくとも一方を変化させるための蛍石で形成されたアキシコン系とを備えていることを特徴とする照明光学装置を提供する。

【0014】第3発明の好ましい態様によれば、前記光源手段は、200nm以下の波長を有する光を供給する。また、前記アキシコン系は、光軸と直交する方向に沿って稜線を有するV字状の凹状断面の屈折面を有する第1プリズムと、前記第1プリズムの前記凹状断面の屈折面と相補的に形成されたV字状の凸状断面の屈折面を有する第2プリズムとを有し、前記第1プリズムは、光軸と前記稜線とを含む面に沿って分割されていることが好ましい。

【0015】本発明の第4発明では、光源手段からの光束に基づいて被照射面を照明する照明光学装置において、所定方向に沿って稜線を有するV字状の凹状断面の屈折面を有するプリズムを備え、前記プリズムは、前記稜線を含む所定の面に沿って分割されていることを特徴とする照明光学装置を提供する。

【0016】第4発明の好ましい態様によれば、前記光源手段からの光束に基づいて二次光源を形成するためのオプティカルインテグレータと、前記オプティカルインテグレータからの光束を前記被照射面へ導くための導光光学系と、前記光源手段と前記オプティカルインテグレータとの間の光路中に配置され、前記オプティカルインテグレータへの入射光束の入射角度と入射位置との少なくとも一方を変化させるための前記プリズムを含むアキシコン系とをさらに備えている。この場合、前記アキシコン系は、光軸と直交する方向に沿って前記稜線を有するV字状の凹状断面の屈折面を有する前記プリズムと、前記プリズムの前記凹状断面の屈折面と相補的に形成されたV字状の凸状断面の屈折面を有する第2プリズムとを有し、前記プリズムは光軸と前記稜線とを含む面に沿って分割されていることが好ましい。

【0017】本発明の第5発明では、被照射面を照明する照明光学装置において、光源手段からの光束に基づいて4極状の光強度分布を有する二次光源を照明面に形成するために、前記光源手段からの光束を4つの光束に変換するための光束変換素子と、前記光束変換素子と前記照明面との間の光路中に配置されて、前記二次光源を構成する4つの実質的な面光源のうちの一方の一对と他方の一对とを光軸を挟んで対称的に移動させるためのアキシコン系とを備え、前記光束変換素子は、光軸と直

交する第1方向に沿って細長く延びた長方形の各隅点を中心として前記4つの実質的な面光源の各々を形成することを特徴とする照明光学装置を提供する。

【0018】第5発明の好ましい態様によれば、前記アキシコン系は、前記第1方向に沿って稜線を有するV字状の凹状断面の屈折面を有する第1プリズムと、前記第1プリズムの前記凹状断面の屈折面と相補的に形成されたV字状の凸状断面の屈折面を有する第2プリズムとを有する第1アキシコン系と、光軸および前記第1方向と直交する第2方向に沿って稜線を有するV字状の凹状断面の屈折面を有する第3プリズムと、前記第3プリズムの前記凹状断面の屈折面と相補的に形成されたV字状の凸状断面の屈折面を有する第4プリズムとを有する第2アキシコン系とを有する。

【0019】本発明の第6発明では、第1発明～第5発明の照明光学装置と、前記被照射面に配置されたマスクのパターンを感光性基板に投影露光するための投影光学系とを備えていることを特徴とする露光装置を提供する。

【0020】本発明の第7発明では、第1発明～第5発明の照明光学装置を介してマスクを照明し、照明された前記マスクに形成されたパターンの像を感光性基板上に投影露光することを特徴とする露光方法を提供する。

【0021】

【発明の実施の形態】本発明の一態様によれば、第1アキシコン系は、光軸に沿って移動可能に構成された第1プリズムと光軸に沿って固定された第2プリズムとを有し、第2アキシコン系は、光軸に沿って固定された第3プリズムと、光軸に沿って移動可能に構成された第4プリズムとを有する。換言すれば、第1アキシコン系および第2アキシコン系を構成する4つのプリズムのうち、外側に配置された2つのプリズムが光軸に沿って移動可能に構成され、内側に配置された2つのプリズムが光軸に沿って固定されている。

【0022】その結果、本発明では、第1プリズムを光軸に沿って移動させるための第1移動機構と、第4プリズムを光軸に沿って移動させるための第2移動機構との間隔が十分に大きく確保されるので、移動機構同士の機械的な干渉を確実に回避することができ、ひいてはコンパクトな全体構成を実現することができる。なお、この場合、光軸に沿って固定された内側の2つのプリズムを一体的に1つのプリズムとして形成することが好ましい。この構成により、アキシコン系における光の透過率を向上させるとともに、プリズム部材の製造誤差および位置決め誤差を抑えることができ、ひいては高精度で高性能なアキシコン系を実現することができる。

【0023】本発明の別の態様によれば、アキシコン系は、円錐状またはV字状の凹状断面の屈折面を有する第1プリズムと、円錐状またはV字状の凸状断面の屈折面を有する第2プリズムとを有する。そして、アキシコ

ン系は、照明瞳の近傍において円錐状の屈折面の頂点に対応して形成される円形状の影領域の直径またはV字状の屈折面の稜線に対応して形成される直線状の影領域の幅が光束全体の大きさの $1/10$ 以下にするための所要の形状および特性を有する。その結果、本発明では、直線状の影領域や円形状の影領域の影響を実質的に受けることなく、照明瞳において所望の光強度分布を得ることができる。

【0024】いずれの態様においても、本発明の照明光学装置では、アキシコン系の作用により4極状や輪帯状の二次光源を適宜変化させて、被照射面上の直交する二方向で互いに異なる照明条件を実現することができる。また、本発明の露光装置および露光方法では、被照射面上の直交する二方向で互いに異なる照明条件を実現することのできる照明光学装置を用いて、パターンに方向性があるマスク上の直交する二方向で最適な照明条件を設定することができ、良好な照明条件のもとで良好なマイクロデバイスを製造することができる。

【0025】本発明の実施形態を、添付図面に基づいて説明する。図1は、本発明の第1実施形態にかかる照明光学装置を備えた露光装置の構成を概略的に示す図である。図1において、感光性基板であるウェハの法線方向に沿ってZ軸を、ウェハ面内において図1の紙面に平行な方向にY軸を、ウェハ面内において図1の紙面に垂直な方向にX軸をそれぞれ設定している。なお、図1では、照明光学装置が4極照明を行うように設定されている。

【0026】図1の露光装置は、露光光（照明光）を供給するための光源1として、たとえば248nmの波長の光を供給するKrFエキシマレーザー光源または193nmの波長の光を供給するArFエキシマレーザー光源を備えている。光源1からZ方向に沿って射出されたほぼ平行光束は、X方向に沿って細長く延びた矩形の断面を有し、一對のレンズ2aおよび2bからなるビームエキスパンダー2に入射する。各レンズ2aおよび2bは、図1の紙面内（YZ平面内）において負の屈折力および正の屈折力をそれぞれ有する。したがって、ビームエキスパンダー2に入射した光束は、図1の紙面内において拡大され、所定の矩形の断面を有する光束に整形される。

【0027】整形光学系としてのビームエキスパンダー2を介したほぼ平行な光束は、折り曲げミラー3でY方向に偏向された後、4極照明用の回折光学素子（DOE）4aに入射する。一般に、回折光学素子は、ガラス基板に露光光（照明光）の波長程度のピッチを有する段差を形成することによって構成され、入射ビームを所望の角度に回折する作用を有する。回折光学素子4aは、矩形の断面を有する平行光束が入射した場合、そのファースフィールド（フラウンホーファー回折領域）において4極状の光強度分布を形成する機能を有する。このよ

うに、回折光学素子4aは、光源1からの光束を4極状の光束に変換するための光束変換素子を構成している。

【0028】なお、回折光学素子4aは、照明光路に対して挿脱自在に構成され、輪帯照明用の回折光学素子4aや通常円形照明用の回折光学素子4cと切り換え可能に構成されている。輪帯照明用の回折光学素子4bおよび通常円形照明用の回折光学素子4cの構成および作用については後述する。具体的には、回折光学素子4aは、光軸AXに平行な所定の軸線回りに回転可能なターレット基板（回転板：図1では不図示）上に支持されている。ターレット基板には、特性の異なる複数の4極照明用の回折光学素子4a、特性の異なる複数の輪帯照明用の回折光学素子4b、および特性の異なる複数の円形照明用の回折光学素子4cが円周方向に沿って設けられている。

【0029】また、ターレット基板は、その中心点を通り光軸AXに平行な軸線回りに回転可能に構成されている。したがって、ターレット基板を回転させることにより、多数の回折光学素子4a～4cから選択された所望の回折光学素子を照明光路中に位置決めすることができる。なお、ターレット基板の回転（ひいては回折光学素子4aと4bと4cとの間の切り換え）は、制御系21からの指令に基づいて動作する第1駆動系22により行われる。ただし、ターレット方式に限定されることなく、たとえば周知のスライド方式により回折光学素子4aと4bと4cとの間の切り換えを行うこともできる。

【0030】回折光学素子4aを介した光束は、アフォーカルレンズ（リレー光学系：第1光学系）5に入射する。アフォーカルレンズ5は、その前側焦点位置と回折光学素子4aの位置とがほぼ一致し且つその後側焦点位置と図中破線で示す所定面6の位置とがほぼ一致するように設定されたアフォーカル系（無焦点光学系）である。したがって、回折光学素子4aに入射したほぼ平行光束は、アフォーカルレンズ5の瞳面に4極状の光強度分布を形成した後、ほぼ平行光束となってアフォーカルレンズ5から射出される。

【0031】なお、アフォーカルレンズ5の前側レンズ群（第1レンズ群）5aと後側レンズ群（第2レンズ群）5bとの間の光路中には、光源側から順に、第1V溝アキシコン系7および第2V溝アキシコン系8が配置されているが、その詳細な構成および作用については後述する。以下、説明を簡単にするために、これらのアキシコン系7および8の作用を無視して、第1実施形態の基本的な構成および作用を説明する。

【0032】アフォーカルレンズ5を介した光束は、 σ 値可変用のズームレンズ（変倍光学系：第2光学系）9を介して、オブティカルインテグレートとしてのマイクロレンズアレイ（またはフライアイレンズ）10に入射する。マイクロレンズアレイ10は、縦横に且つ稠密に配列された多数の正屈折力を有する微小レンズからなる

光学素子である。一般に、マイクロレンズアレイは、たとえば平行平面ガラス板にエッチング処理を施して微小レンズ群を形成することによって構成される。

【0033】ここで、マイクロレンズアレイを構成する各微小レンズは、フライアイレンズを構成する各レンズエレメントよりも微小である。また、マイクロレンズアレイは、互いに隔絶されたレンズエレメントからなるフライアイレンズとは異なり、多数の微小レンズが互いに隔絶されることなく一体的に形成されている。しかしながら、正屈折力を有するレンズ要素が縦横に配置されている点でマイクロレンズアレイはフライアイレンズと同じである。なお、図1では、図面の明瞭化のために、マイクロレンズアレイ10を構成する微小レンズの数を実際よりも非常に少なく表している。

【0034】なお、 σ 値とは、投影光学系PLの瞳の大きさ(直径)を $R1$ とし、投影光学系PLの瞳に形成される照明光束または光源像の大きさ(直径)を $R2$ とし、投影光学系PLのマスク(レチクル)M側の開口数を NA_o とし、マスク(レチクル)Mを照明する照明光学系の開口数を NA_i とすると、 $\sigma = NA_i / NA_o = R2 / R1$ として定義される。

【0035】但し、輪帯照明の場合、 $R2$ は投影光学系PLの瞳に形成される輪帯状の照明光束または輪帯状の光源像の外径であり、 NA_i は照明光学系の瞳に形成される輪帯光束の外径によって定められる開口数である。また、4極照明等の多極照明の場合、 $R2$ は投影光学系PLの瞳に形成される多極状の照明光束または多極状の光源像に外接する円の大きさまたは直径であり、 NA_i は照明光学系の瞳に形成される多極状の照明光束に外接する円の大きさまたは直径によって定められる開口数である。また、輪帯照明の場合、輪帯比とは、輪帯状の照明光束の外径を R_o 、輪帯状の照明光束の内径を R_i とすると、 R_i / R_o で定義される。

【0036】なお、所定面6の位置はズームレンズ9の前側焦点位置の近傍に配置され、マイクロレンズアレイ10の入射面はズームレンズ9の後側焦点位置の近傍に配置されている。換言すると、ズームレンズ9は、所定面6とマイクロレンズアレイ10の入射面とを実質的にフーリエ変換の関係に配置し、ひいてはアフォーカルレンズ5の瞳面とマイクロレンズアレイ10の入射面とを光学的にほぼ共役位置に配置している。したがって、マイクロレンズアレイ10の入射面上には、アフォーカルレンズ5の瞳面と同様に、たとえば光軸AXに対して偏心した4つの照野からなる4極状の照野を形成する。

【0037】ここで、4極状の照野を構成する各照野の形状は回折光学素子4aの特性に依存するが、ここでは4つの円形状の照野からなる4極状の照野が形成されるものとする。この4極状の照野の全体形状は、ズームレンズ9の焦点距離に依存して相似的变化する。なお、ズームレンズ7の焦点距離の変化は、制御系21からの

指令に基づいて動作する第2駆動系23により行われる。

【0038】マイクロレンズアレイ10を構成する各微小レンズは、マスクM上において形成すべき照野の形状(ひいてはウェハW上において形成すべき露光領域の形状)と相似な矩形形状の断面を有する。こうして、マイクロレンズアレイ10に入射した光束は多数の微小レンズにより二次元的に分割され、その後側焦点面(ひいては照明光学系の瞳)には、図2に示すように、マイクロレンズアレイ10への入射光束によって形成される照野とほぼ同じ光強度分布を有する二次光源、すなわち光軸AXに対して偏心した4つの円形状の実質的な面光源からなる4極状の二次光源が形成される。このように、マイクロレンズアレイ10は、光源1からの光束に基づいて多数光源を形成するためのオプティカルインテグレータを構成している。

【0039】マイクロレンズアレイ10の後側焦点面に形成された4極状の二次光源からの光束は、コンデンサー光学系11の集光作用を受けた後、照明視野絞りとしてのマスクブラインド12を重疊的に照明する。マスクブラインド12の矩形形状の開口部(光透過部)を介した光束は、結像光学系13の集光作用を受けた後、マスクMを重疊的に照明する。マスクMのパターンを透過した光束は、投影光学系PLを介して、ウェハW上にマスクパターンの像を形成する。投影光学系PLの入射瞳面には投影光学系PLの開口数を規定するための可変開口絞りが設けられ、この可変開口絞りの駆動は制御系21からの指令に基づいて動作する第3駆動系24により行われる。

【0040】こうして、投影光学系PLの光軸AXと直交する平面(XY平面)内においてウェハWを二次元的に駆動制御しながら一括露光またはスキャン露光を行うことにより、ウェハWの各露光領域にはマスクMのパターンが逐次露光される。なお、一括露光では、いわゆるステップ・アンド・リピート方式にしたがって、ウェハの各露光領域に対してマスクパターンを一括的に露光する。この場合、マスクM上での照明領域の形状は正方形に近い矩形形状であり、マイクロレンズアレイ10の各微小レンズの断面形状も正方形に近い矩形形状となる。

【0041】一方、スキャン露光では、いわゆるステップ・アンド・スキャン方式にしたがって、マスクおよびウェハを投影光学系に対して相対移動させながらウェハの各露光領域に対してマスクパターンをスキャン露光する。この場合、マスクM上での照明領域の形状は短辺と長辺との比がたとえば1:3の矩形形状であり、マイクロレンズアレイ10の各微小レンズの断面形状もこれと相似な矩形形状となる。

【0042】図3は、第1実施形態においてアフォーカルレンズの前側レンズ群と後側レンズ群との間の光路中に配置された2つのアキシコン系の構成を概略的に示す

斜視図である。第1実施形態では、図3に示すように、アフォーカルレンズ5の前側レンズ群5aと後側レンズ群5bとの間の光路中に、光源側から順に、第1V溝アキシコン系7および第2V溝アキシコン系8が配置されている。

【0043】第1V溝アキシコン系7は、光源側に平面を向け且つマスク側に凹状で且つV字状の屈折面を向けた第1プリズム部材7aと、マスク側に平面を向け且つ光源側に凸状で且つV字状の屈折面を向けた第2プリズム部材7bとから構成されている。第1プリズム部材7aの凹状屈折面は2つの平面から構成され、その交線（稜線）はZ方向に沿って延びている。第2プリズム部材7bの凸状屈折面は、第1プリズム部材7aの凹状屈折面と互いに当接可能なように、換言すると第1プリズム部材7aの凹状屈折面と相補的に形成されている。

【0044】すなわち、第2プリズム部材7bの凸状屈折面も2つの平面から構成され、その交線（稜線）はZ方向に沿って延びている。また、第1プリズム部材7aが光軸AXに沿って移動可能に構成され、第2プリズム部材7bが光軸AXに沿って固定され、第1プリズム部材7aの凹状屈折面と第2プリズム部材7bの凸状屈折面との間隔が可変に構成されている。第1V溝アキシコン系7の間隔の変化は、制御系21からの指令に基づいて動作する第4駆動系25により行われる。

【0045】また、第2V溝アキシコン系8は、光源側に平面を向け且つマスク側に凹状でV字状の屈折面を向けた第1プリズム部材8aと、マスク側に平面を向け且つ光源側に凸状で且つV字状の屈折面を向けた第2プリズム部材8bとから構成されている。第1プリズム部材8aの凹状屈折面は2つの平面から構成され、その交線はX方向に沿って延びている。第2プリズム部材8bの凸状屈折面は、第1プリズム部材8aの凹状屈折面と相補的に形成されている。すなわち、第2プリズム部材8bの凸状屈折面も2つの平面から構成され、その交線はX方向に沿って延びている。

【0046】また、第1プリズム部材8aが光軸AXに沿って固定され、第2プリズム部材8bが光軸AXに沿って移動可能に構成され、第1プリズム部材8aの凹状屈折面と第2プリズム部材8bの凸状屈折面との間隔が可変に構成されている。第2V溝アキシコン系8の間隔の変化は、制御系21からの指令に基づいて動作する第5駆動系26により行われる。

【0047】ここで、対向する凹状屈折面と凸状屈折面とが互いに当接している状態では、第1V溝アキシコン系7および第2V溝アキシコン系8は平行平板として機能し、形成される4極状の二次光源に及ぼす影響はない。しかしながら、第1V溝アキシコン系7は、凹状屈折面と凸状屈折面とを離間させると、Z方向に沿って平行平板として機能するが、X方向に沿ってビームエキスパンダーとして機能する。また、第2V溝アキシコン

系8は、凹状屈折面と凸状屈折面とを離間させると、X方向に沿って平行平板として機能するが、Z方向に沿ってビームエキスパンダーとして機能する。

【0048】図4は、第1実施形態の4極照明において形成される二次光源に対するズームレンズの作用を説明する図である。第1実施形態の4極照明では、ズームレンズ9の焦点距離が変化すると、4つの円形状の面光源42a～42dから構成される4極状の二次光源の全体形状が相似的に変化する。すなわち、4極状の二次光源を構成する円形状の各面光源42a～42dが、円形状を維持したまま光軸AXを中心とした円の径方向に沿って移動する。

【0049】そして、変化前の各面光源42a～42dの中心点と変化後の各面光源43a～43dの中心点とを結ぶ線分は光軸AXを通り、中心点の移動距離および移動の向きはズームレンズ9の焦点距離の変化に依存する。また、変化前の各面光源42a～42dを光軸AXから見込む角度と、変化後の各面光源43a～43dを光軸AXから見込む角度とが等しい。こうして、ズームレンズ9の焦点距離を変化させることにより、4極状の二次光源の輪帯比（4つの面光源に内接する円の直径／4つの面光源に外接する円の直径）を変化させることなくその外径（4つの面光源に外接する円の直径）だけを変更することができる。

【0050】図5は、第1実施形態の4極照明において形成される二次光源に対する第1V溝アキシコン系および第2V溝アキシコン系の作用を説明する図である。第1V溝アキシコン系7の間隔の変化に伴って、所定面6への入射光束のZ方向に沿った入射角度は変化しないが、所定面6への入射光束のX方向に沿った入射角度は変化する。その結果、図5(a)に示すように、4つの円形状の面光源44a～44dは、Z方向には移動しないが、その形状および大きさを維持したままX方向に沿って光軸AXを挟んで対称に移動する。すなわち、第1V溝アキシコン系7の間隔が拡大すると、面光源44bおよび44cは-X方向に移動し、面光源44aおよび44dは+X方向に移動する。

【0051】一方、第2V溝アキシコン系8の間隔の変化に伴って、所定面6への入射光束のX方向に沿った入射角度は変化しないが、所定面6への入射光束のZ方向に沿った入射角度は変化する。その結果、図5(b)に示すように、4つの円形状の面光源44a～44dは、X方向には移動しないが、その形状および大きさを維持したままZ方向に沿って光軸AXを挟んで対称に移動する。すなわち、第2V溝アキシコン系8の間隔が拡大すると、面光源44aおよび44bは+Z方向に移動し、面光源44cおよび44dは-Z方向に移動する。

【0052】さらに、第1V溝アキシコン系7の間隔および第2V溝アキシコン系8の間隔がともに変化すると、所定面6への入射光束のX方向に沿った入射角度お

よびZ方向に沿った入射角度はともに変化する。その結果、図5(c)に示すように、各面光源44a~44dは、その形状および大きさを維持したままZ方向およびX方向に沿って光軸AXを挟んで対称に移動する。すなわち、第1V溝アキシコン系7の間隔および第2V溝アキシコン系8の間隔がともに拡大すると、面光源44aは+Z方向および+X方向に移動し、面光源44bは+Z方向および-X方向に移動し、面光源44cは-Z方向および-X方向に移動し、面光源44dは-Z方向および+X方向に移動する。

【0053】こうして、第1V溝アキシコン系7、第2V溝アキシコン系8およびズームレンズ9の作用により、4極状の二次光源を構成する各面光源の位置を広範囲に亘って移動させることができ、且つその大きさを所定の範囲に亘って変化させることができる。しかしながら、実際には、第1V溝アキシコン系7や第2V溝アキシコン系8による各面光源の移動比率（すなわち移動先の面光源の座標位置に対する移動元の面光源の座標位置）には光学設計上の制約があり、各面光源の移動範囲には制限がある。

【0054】そこで、第1実施形態では、4極照明用の回折光学素子4aとして、特性の異なる3種類の回折光学素子を備えている。すなわち、第1の4極照明用回折光学素子により、4つの面光源の中心点を結んで形成される四角形が正方形になるような4極状の二次光源（図2を参照）が形成される。また、第2の4極照明用回折光学素子により、4つの面光源の中心点を結んで形成される四角形がX方向に沿って細長い長方形になるような4極状の二次光源が形成される。さらに、第3の4極照明用回折光学素子により、4つの面光源の中心点を結んで形成される四角形がZ方向に沿って細長い長方形になるような4極状の二次光源が形成される。

【0055】こうして、第1実施形態の4極照明では、第1V溝アキシコン系7や第2V溝アキシコン系8による各面光源の移動比率（ひいてはその移動範囲）が光学設計の観点からある程度制限される場合であっても、特性の異なる3種類の4極照明用回折光学素子を併用することにより、光軸AXを中心とする円環状の領域において各面光源の位置を自在に移動させることができる。

【0056】ところで、前述したように、回折光学素子4aは、照明光路に対して挿脱自在に構成され、且つ輪帯照明用の回折光学素子4bや通常円形照明用の回折光学素子4cと切り換え可能に構成されている。以下、回折光学素子4aに代えて回折光学素子4bを照明光路中に設定することによって得られる輪帯照明について簡単に説明する。

【0057】4極照明用の回折光学素子4aに代えて輪帯照明用の回折光学素子4bを照明光路中に設定すると、回折光学素子4bを介して輪帯状の光束が形成される。回折光学素子4bを介して形成された輪帯状の光束

は、アフォーカルレンズ5に入射し、瞳面にリング状の像（リング状の光源）を形成する。このリング状の像からの光は、ほぼ平行光束となってアフォーカルレンズ5から射出され、ズームレンズ9を介して、マイクロレンズアレイ10の入射面に、光軸AXを中心とした輪帯状の照野を形成する。その結果、マイクロレンズアレイ10の後側焦点面には、入射面に形成された照野とほぼ同じ光強度を有する二次光源、すなわち光軸AXを中心とした輪帯状の二次光源が形成される。

【0058】図6は、第1実施形態の輪帯照明において形成される二次光源に対するズームレンズの作用を説明する図である。第1実施形態の輪帯照明では、ズームレンズ9の焦点距離を増大させることにより、初期的に形成されていた輪帯状の二次光源60aが、その全体形状が相似的に拡大された輪帯状の二次光源60cに変化する。換言すると、輪帯状の二次光源は、ズームレンズ9の作用により、その輪帯比が変化することなく、その幅および大きさ（外径）がともに変化する。

【0059】図7は、第1実施形態の輪帯照明において形成される二次光源に対する第1V溝アキシコン系および第2V溝アキシコン系の作用を説明する図である。上述したように、第1V溝アキシコン系7の間隔の変化に伴って、所定面6への入射光束のZ方向に沿った入射角度は変化しないが、所定面6への入射光束のX方向に沿った入射角度は変化する。その結果、図7(a)に示すように、輪帯状の二次光源60aを構成する4つの四半円弧状の各面光源61~64は、Z方向には移動しないがX方向に沿って光軸AXを挟んで対称に移動する。すなわち、第1V溝アキシコン系7の間隔が拡大すると、面光源61および63は-X方向に移動し、面光源62および64は+X方向に移動する。

【0060】一方、第2V溝アキシコン系8の間隔の変化に伴って、所定面6への入射光束のX方向に沿った入射角度は変化しないが、所定面6への入射光束のZ方向に沿った入射角度は変化する。その結果、図7(b)に示すように、各面光源61~64は、X方向には移動しないがZ方向に沿って光軸AXを挟んで対称に移動する。すなわち、第2V溝アキシコン系8の間隔が拡大すると、面光源61および62は+Z方向に移動し、面光源63および64は-Z方向に移動する。

【0061】さらに、第1V溝アキシコン系7の間隔および第2V溝アキシコン系8の間隔がともに変化すると、所定面6への入射光束のX方向に沿った入射角度およびZ方向に沿った入射角度はともに変化する。その結果、図7(c)に示すように、各面光源61~64は、Z方向およびX方向に沿って光軸AXを挟んで対称に移動する。すなわち、第1V溝アキシコン系7の間隔および第2V溝アキシコン系8の間隔が拡大すると、面光源61は+Z方向および-X方向に移動し、面光源62は+Z方向および+X方向に移動し、面光源63は-Z方

向および-X方向に移動し、面光源64は-Z方向および+X方向に移動する。こうして、4つの独立した円弧状の面光源からなる4極状の二次光源を形成することができる。

【0062】以上、第1実施形態の輪帯照明における第1V溝アキシコン系7および第2V溝アキシコン系8の作用とズームレンズ9の作用とを個別に説明したが、これらの光学部材の相互作用により様々な形態の輪帯照明が可能である。具体的には、図7(c)に示す状態において、ズームレンズ9を作用させると、たとえば面光源62は、光軸AXを中心とした円の径方向に沿って移動し、その全体形状が相似的に変化した面光源62aに変化する。

【0063】さらに、4極照明用の回折光学素子4aまたは輪帯照明用の回折光学素子4bに代えて円形照明用の回折光学素子4cを照明光路中に設定することによって得られる通常の円形照明について簡単に説明する。この場合、回折光学素子4cに入射したほぼ平行光束は、アフォーカルレンズ5の瞳面に円形状の光強度分布を形成した後、ほぼ平行光束となってアフォーカルレンズ5から射出される。

【0064】アフォーカルレンズ5を介した光束は、ズームレンズ9を介して、マイクロレンズアレイ10の入射面に、光軸AXを中心とした円形状の照野を形成する。その結果、マイクロレンズアレイ10の後側焦点面(すなわち照明光学系の瞳)には、その入射光束によって形成される照野とほぼ同じ光強度分布を有する二次光源、すなわち光軸AXを中心とした円形状の二次光源が形成される。

【0065】第1実施形態の円形照明では、初期的で形成された円形状の二次光源が、ズームレンズ9の焦点距離を増大させることにより、その全体形状が相似的に拡大された円形状の二次光源に変化する。換言すると、第1実施形態の円形照明では、ズームレンズ9の焦点距離を変化させることにより、円形状の二次光源の大きさ(外径)を変更することができる。

【0066】図8は、第1実施形態の円形照明において形成される二次光源に対する第1V溝アキシコン系および第2V溝アキシコン系の作用を説明する図である。第1実施形態の円形照明では、第1V溝アキシコン系7の間隔が拡大すると、図8(a)に示すように、円形状の二次光源を構成する4つの四半円状の面光源66a~66dのうち、面光源66aおよび66cは-X方向に移動し、面光源66bおよび66dは+X方向に移動する。

【0067】一方、第2V溝アキシコン系8の間隔が拡大すると、図8(b)に示すように、面光源66aおよび66bは+Z方向に移動し、面光源66cおよび66dは-Z方向に移動する。さらに、第1V溝アキシコン系7の間隔および第2V溝アキシコン系8の間隔がとも

に拡大すると、図8(c)に示すように、面光源66aは+Z方向および-X方向に移動し、面光源66bは+Z方向および+X方向に移動し、面光源66cは-Z方向および-X方向に移動し、面光源66dは-Z方向および+X方向に移動する。こうして、4つの独立した4半円状の面光源からなる4極状の二次光源を形成することができる。

【0068】以上、第1実施形態の円形照明における第1V溝アキシコン系7および第2V溝アキシコン系8の作用とズームレンズ9の作用とを個別に説明したが、これらの光学部材の相互作用により様々な形態の円形照明が可能である。しかしながら、実際には、光学設計上の制約により、ズームレンズ9による外径の変倍範囲には制限がある。そこで、第1実施形態では、円形照明用の回折光学素子4cとして、特性の異なる2種類の回折光学素子を備えている。

【0069】すなわち、第1実施形態では、一方の円形照明用回折光学素子により、比較的小さい σ 値すなわち小 σ から中間的な σ 値すなわち中 σ までの範囲で σ 値を変更するのに適した形状を有する円形状の二次光源を形成する。また、他方の円形照明用回折光学素子により、中 σ から比較的大きい σ 値すなわち大 σ までの範囲で σ 値を変更するのに適した形状を有する円形状の二次光源を形成する。その結果、2種類の円形照明用回折光学素子の併用により、小 σ から大 σ までの範囲(たとえば $0.1 \leq \sigma \leq 0.95$)で σ 値を変更することが可能になる。

【0070】以下、第1実施形態における照明条件の切り換え動作などについて具体的に説明する。まず、ステップ・アンド・リビート方式またはステップ・アンド・スキャン方式にしたがって順次露光すべき各種のマスクに関する情報などが、キーボードなどの入力手段20を介して制御系21に入力される。制御系21は、各種のマスクに関する最適な線幅(解像度)、焦点深度等の情報を内部のメモリー部に記憶しており、入力手段20からの入力に応答して駆動系22~26に適当な制御信号を供給する。

【0071】すなわち、最適な解像度および焦点深度のもとで4極照明する場合、駆動系22は制御系21からの指令に基づいて4極照明用の回折光学素子4aを照明光路中に位置決めする。そして、所望の形態を有する4極状の二次光源を得るために、駆動系25および26は制御系21からの指令に基づいてアキシコン系7および8の間隔を設定し、駆動系23は制御系21からの指令に基づいてズームレンズ9の焦点距離を設定する。また、駆動系24は、制御系21からの指令に基づいて投影光学系PLの可変開口絞りを駆動する。

【0072】さらに、必要に応じて、駆動系25および26によりアキシコン系7および8の間隔を変化させたり、駆動系23によりズームレンズ9の焦点距離を変化

させたりすることにより、マイクロレンズアレイ10の後側焦点面に形成される4極状の二次光源の形態を適宜変更することができる。こうして、4極状の二次光源の全体の大きさ(外径)および形状(輪帯比)、各面光源の位置、形状、大きさなどを適宜変化させて、多様な4極照明を行うことができる。

【0073】また、最適な解像度および焦点深度のもとで輪帯照明する場合、駆動系22は、制御系21からの指令に基づいて、輪帯照明用の回折光学素子4bを照明光路中に位置決めする。そして、所望の形態を有する輪帯状の二次光源を得るために、あるいは輪帯状の二次光源から派生的に得られる4極状の二次光源または2極状の二次光源を得るために、駆動系25および26は制御系21からの指令に基づいてアキシコン系7および8の間隔を設定し、駆動系23は制御系21からの指令に基づいてズームレンズ9の焦点距離を設定する。また、駆動系24は、制御系21からの指令に基づいて投影光学系PLの可変開口絞りを駆動する。

【0074】さらに、必要に応じて、駆動系25および26によりアキシコン系7および8の間隔を変化させたり、駆動系23によりズームレンズ9の焦点距離を変化させたりすることにより、マイクロレンズアレイ10の後側焦点面に形成される輪帯状の二次光源の形態、あるいは派生的に得られる4極状の二次光源または2極状の二次光源の形態を適宜変更することができる。こうして、輪帯状の二次光源の全体の大きさ(外径)および形状(輪帯比)、派生的に得られる各面光源の位置、形状、大きさなどを適宜変化させて、多様な輪帯照明を行うことができる。

【0075】さらに、最適な解像度および焦点深度のもとで通常の円形照明をする場合、駆動系22は、制御系21からの指令に基づいて、円形照明用の回折光学素子4cを照明光路中に位置決めする。そして、所望の形態を有する円形状の二次光源を得るために、あるいは円形状の二次光源から派生的に得られる4極状の二次光源または2極状の二次光源を得るために、駆動系25および26は制御系21からの指令に基づいてアキシコン系7および8の間隔を設定し、駆動系23は制御系21からの指令に基づいてズームレンズ9の焦点距離を設定する。また、駆動系24は、制御系21からの指令に基づいて投影光学系PLの可変開口絞りを駆動する。

【0076】さらに、必要に応じて、駆動系25および26によりアキシコン系7および8の間隔を変化させたり、駆動系23によりズームレンズ9の焦点距離を変化させたりすることにより、マイクロレンズアレイ10の後側焦点面に形成される円形状の二次光源の形態、あるいは派生的に得られる4極状の二次光源または2極状の二次光源の形態を適宜変更することができる。こうして、円形状の二次光源の全体の大きさ(ひいては σ 値)、派生的に得られる各面光源の位置、形状、大きさ

などを適宜変化させて、多様な円形照明を行うことができる。

【0077】なお、第1実施形態では、光源側から順に、第1V溝アキシコン系7と、第2V溝アキシコン系8とを配置しているが、この配置順序を適宜変化させることもできる。また、各アキシコン系7および8では、光源側から順に、凹状の屈折面を有する第1プリズム部材と凸状の屈折面を有する第2プリズム部材とを配置しているが、この配置順序を逆にすることもできる。

【0078】図9は、本発明の第2実施形態にかかる照明光学装置を備えた露光装置の構成を概略的に示す図である。また、図10は、第2実施形態においてアフォーカルレンズの光路中に配置された円錐アキシコン系およびV溝アキシコン系の構成を概略的に示す斜視図である。第2実施形態は、第1実施形態と類似の構成を有する。しかしながら、第1実施形態ではアフォーカルレンズ5の光路中に2つのV溝アキシコン系が配置されているのに対し、第2実施形態では1つの円錐アキシコン系と1つのV溝アキシコン系とが配置されている点が第1実施形態と基本的に相違している。以下、第1実施形態との相違点に着目して、第2実施形態を説明する。

【0079】第2実施形態では、図10に示すように、アフォーカルレンズ5の前側レンズ群5aと後側レンズ群5bとの間の光路中に、光源側から順に、円錐アキシコン系14およびV溝アキシコン系15が配置されている。円錐アキシコン系14は、光源側から順に、光源側に平面を向け且つマスク側に凹円錐状の屈折面を向けた第1プリズム部材14aと、マスク側に平面を向け且つ光源側に凸円錐状の屈折面を向けた第2プリズム部材14bとから構成されている。

【0080】そして、第1プリズム部材14aの凹円錐状の屈折面と第2プリズム部材14bの凸円錐状の屈折面とは、互いに当接可能なように相補的に形成されている。また、第1プリズム部材14aが光軸AXに沿って移動可能に構成され、第2プリズム部材14bが光軸AXに沿って固定され、第1プリズム部材14aの凹円錐状の屈折面と第2プリズム部材14bの凸円錐状の屈折面との間隔が可変に構成されている。円錐アキシコン系14の間隔の変化は、制御系21からの指令に基づいて動作する駆動系27により行われる。

【0081】ここで、第1プリズム部材14aの凹円錐状屈折面と第2プリズム部材14bの凸円錐状屈折面とが互いに当接している状態では、円錐アキシコン系14は平行平板として機能し、形成される4極状の二次光源に及ぼす影響はない。しかしながら、第1プリズム部材14aの凹円錐状屈折面と第2プリズム部材14bの凸円錐状屈折面とを離間させると、円錐アキシコン系14は、いわゆるビームエキスパンダーとして機能する。したがって、円錐アキシコン系14の間隔の変化に伴って、所定面6への入射光束の角度は変化する。

【0082】また、V溝アキシコン系15は、第1実施形態における第1V溝アキシコン系7と同様に、光源側に平面を向け且つマスク側に凹状で且つV字状の屈折面を向けた第1プリズム部材15aと、マスク側に平面を向け且つ光源側に凸状で且つV字状の屈折面を向けた第2プリズム部材15bとから構成されている。第1プリズム部材15aの凹状屈折面は2つの平面から構成され、その交線（稜線）はZ方向に沿って延びている。第2プリズム部材15bの凸状屈折面は、第1プリズム部材15aの凹状屈折面と互いに当接可能なように、換言すると第1プリズム部材15aの凹状屈折面と相補的に形成されている。

【0083】すなわち、第2プリズム部材15bの凸状屈折面も2つの平面から構成され、その交線（稜線）はZ方向に沿って延びている。また、第1プリズム部材15aが光軸AXに沿って固定され、第2プリズム部材15bが光軸AXに沿って移動可能に構成され、第1プリズム部材15aの凹状屈折面と第2プリズム部材15bの凸状屈折面との間隔が可変に構成されている。V溝アキシコン系15の間隔の変化は、制御系21からの指令に基づいて動作する駆動系28により行われる。

【0084】ここで、対向する凹状屈折面と凸状屈折面とが互いに当接している状態では、V溝アキシコン系15は平行平板として機能し、形成される4極状の二次光源に及ぼす影響はない。しかしながら、V溝アキシコン系15は、第1実施形態における第1V溝アキシコン系7と同様に、凹状屈折面と凸状屈折面とを離間させると、Z方向に沿って平行平板として機能するが、X方向に沿ってビームエキスパンダーとして機能する。なお、図9および図10では、V溝アキシコン系15が第1実施形態における第1V溝アキシコン系7と同じ構成を有するが、第2V溝アキシコン系8と同じ構成としてもよい。

【0085】図11は、第2実施形態の4極照明において形成される二次光源に対する円錐アキシコン系の作用を説明する図である。第2実施形態の4極照明では、円錐アキシコン系14の間隔を拡大させることにより、4極状の二次光源を構成する円形状の各面光源40a～40dが光軸AXを中心とした円の径方向に沿って外方へ移動するとともに、その形状が円形状から楕円形状に変化する。すなわち、変化前の円形状の各面光源40a～40dの中心点と変化後の楕円形状の各面光源41a～41dの中心点とを結ぶ線分は光軸AXを通り、中心点の移動距離は円錐アキシコン系14の間隔に依存する。

【0086】さらに、変化前の円形状の各面光源40a～40dを光軸AXから見込む角度（光軸AXから各面光源40a～40dへの一対の接線がなす角度）と、変化後の楕円形状の各面光源41a～41dを光軸AXから見込む角度とが等しい。そして、変化前の円形状の各面光源40a～40dの直径と、変化後の楕円形状の各面

光源41a～41dの光軸AXを中心とした円の径方向に沿った短径とが等しい。なお、変化後の楕円形状の各面光源41a～41dの光軸AXを中心とした円の周方向に沿った長径の大きさは、変化前の円形状の各面光源40a～40dの直径と円錐アキシコン系14の間隔とに依存する。

【0087】したがって、円錐アキシコン系14の間隔を零から所定の値まで拡大させると、4つの円形状の面光源から構成される4極状の二次光源が、4つの楕円形状の面光源から構成される4極状の二次光源に変化し、変化前の二次光源の幅を変化させることなく、その外径および輪帯比を変更することができる。ここで、4極状の二次光源の幅は、4つの面光源に外接する円の直径すなわち外径と4つの面光源に内接する円の直径すなわち内径との差の $1/2$ として規定される。また、4極状の二次光源の輪帯比は、外径に対する内径の比（内径／外径）として規定される。

【0088】以上のように、第2実施形態の4極照明では、1つのV溝アキシコン系15しか配置されていないので、4極状の二次光源を構成する円形状の各面光源の形状および大きさを維持したままその位置だけを二次元的に変化させることはできない。しかしながら、複数の4極照明用回折光学素子4aを選択的に用いるとともに、円錐アキシコン系14、V溝アキシコン系15、およびズームレンズ9の作用を利用することにより、光軸AXを中心とする円環状の領域において、各面光源の位置、形状および大きさを適宜変更することができる。

【0089】図12は、第2実施形態の輪帯照明において形成される二次光源に対する円錐アキシコン系の作用を説明する図である。第2実施形態の輪帯照明では、初期的に形成された輪帯状の二次光源60aが、円錐アキシコン系14の間隔を拡大させることにより、その幅（外径と内径との差の $1/2$ ：図中矢印で示す）が変化することなく、その外径および内径がともに拡大された輪帯状の二次光源60bに変化する。換言すると、輪帯状の二次光源は、円錐アキシコン系14の作用により、その幅が変化することなく、その輪帯比および大きさ（外径）がともに変化する。

【0090】しかしながら、実際には、光学設計上の制約により、円錐アキシコン系14による輪帯比の変更範囲には制限がある。そこで、第2実施形態では、輪帯照明用の回折光学素子4bとして、特性の異なる2種類の回折光学素子を備えている。すなわち、第2実施形態では、一方の輪帯照明用回折光学素子により、たとえば0.5～0.68の範囲で輪帯比を変更するのに適した形状を有する輪帯状の二次光源を形成する。また、他方の輪帯照明用回折光学素子により、たとえば0.68～0.8の範囲で輪帯比を変更するのに適した形状を有する輪帯状の二次光源を形成する。その結果、2種類の輪帯照明用回折光学素子の併用により、0.5～0.8の

範囲で輪帯比を変更することが可能になる。

【0091】以上のように、第2実施形態の輪帯照明では、1つのV溝アキシコン系15しか配置されていないので、輪帯状の二次光源から派生的に4極状の二次光源を得ることはできない。しかしながら、複数の輪帯照明用回折光学素子4bを選択的に用いるとともに、円錐アキシコン系14、V溝アキシコン系15、およびズームレンズ9の作用を利用することにより、輪帯状の二次光源の全体的な大きさおよび形状（輪帯比）、あるいは輪帯状の二次光源から派生的に得られる2極状の二次光源を構成する各面光源の位置、形状および大きさを適宜変更することができる。

【0092】さらに、第2実施形態の円形照明では、1つのV溝アキシコン系15しか配置されていないので、円形状の二次光源から派生的に4極状の二次光源を得ることはできない。しかしながら、複数の円形照明用回折光学素子4cを選択的に用いるとともに、円錐アキシコン系14、V溝アキシコン系15、およびズームレンズ9の作用を利用することにより、円形状の二次光源の全体的な大きさ、あるいは円形状の二次光源から派生的に得られる2極状の二次光源を構成する各面光源の位置、形状および大きさを適宜変更することができる。

【0093】図13は、本発明の第3実施形態にかかる照明光学装置を備えた露光装置の構成を概略的に示す図である。第3実施形態は、第1実施形態と類似の構成を有する。しかしながら、第3実施形態では、波面分割型のオプティカルインテグレータ（マイクロレンズアレイ10）に代えて、内面反射型のオプティカルインテグレータ（ロッド型インテグレータ70）を用いている点が第1実施形態と基本的に相違している。以下、第1実施形態との相違点に着目して、第3実施形態を説明する。

【0094】第3実施形態では、マイクロレンズアレイ10に代えてロッド型インテグレータ70を配置していることに対応して、回折光学素子4とロッド型インテグレータ70との間の光路中に、光源側から順に、ズームレンズ71、第2回折光学素子（またはマイクロレンズアレイ）72、およびインプットレンズ73を配置している。また、照明視野絞りとしてのマスクブラインド12は、ロッド型インテグレータ70の射出面の近傍に配置されている。

【0095】ここで、ズームレンズ71は、その前側焦点位置が回折光学素子4の位置とほぼ一致し且つその後側焦点位置が第2回折光学素子72の位置とほぼ一致するように配置されている。なお、ズームレンズ71の焦点距離の変化は、制御系21からの指令に基づいて動作する駆動系29により行われる。また、インプットレンズ73は、その前側焦点位置が第2回折光学素子72の位置とほぼ一致し且つその後側焦点位置がロッド型インテグレータ70の入射面の位置とほぼ一致するように配置されている。

【0096】ロッド型インテグレータ70は、石英ガラスや蛍石のような硝子材料からなる内面反射型のガラスロッドであり、内部と外部との境界面すなわち内面での全反射を利用して集光点を通りロッド入射面に平行な面に沿って内面反射数に応じた数の光源像を形成する。ここで、形成される光源像のほとんどは虚像であるが、中心（集光点）の光源像のみが実像となる。すなわち、ロッド型インテグレータ70に入射した光束は内面反射により角度方向に分割され、集光点を通りその入射面に平行な面に沿って多数の光源像からなる二次光源が形成される。

【0097】したがって、第3実施形態の4極照明（輪帯照明または円形照明）では、照明光路に選択的に設置された回折光学素子4a（4bまたは4c）を通過した光束が、ズームレンズ71を介して、第2回折光学素子72上に4極状（輪帯状または円形状）の照野を形成する。第2回折光学素子72を通過した光束は、インプットレンズ73を介して、ロッド型インテグレータ70の入射面の近傍に集光する。図14は、第3実施形態における第2回折光学素子の作用を説明する図である。

【0098】図14（a）に示すように、第2回折光学素子72が配置されていない場合、ズームレンズ71およびインプットレンズ73を介した光束が、ロッド型インテグレータ70の入射面70a上においてほぼ一点に集光する。その結果、ロッド型インテグレータ70によりその入射側に形成される多数の光源が非常に散逸的になり（二次光源全体に対する各光源の充填率が小さくなり）、実質的な面光源を得ることができなくなってしまう。

【0099】そこで、第3実施形態では、光束発散素子としての第2回折光学素子72をインプットレンズ73の前側焦点位置の近傍に配置している。こうして、図14（b）に示すように、第2回折光学素子72を介して発散された光束が、インプットレンズ73を介して、ロッド型インテグレータ70の入射面70a上において所定の広がりをもって集光する。その結果、ロッド型インテグレータ70によりその入射側に形成される多数の光源が非常に密実になり（二次光源全体に対する各光源の充填率が大きくなり）、実質的な面光源としての二次光源を得ることができる。

【0100】ロッド型インテグレータ70によりその入射側に形成された4極状（輪帯状または円形状）の二次光源からの光束は、その射出面において重畳された後、マスクブラインド12および結像光学系13を介して、所定のパターンが形成されたマスクMを照明する。なお、第3実施形態では、ズームレンズ71の前側レンズ群71aと後側レンズ群71bとの間の光路中に、光源側から順に、第1V溝アキシコン系7および第2V溝アキシコン系8が配置されている。

【0101】したがって、第3実施形態の4極照明にお

いても第1実施形態と同様に、複数の4極照明用回折光学素子4aを選択的に用いるとともに、第1V溝アキシコン系7、第2V溝アキシコン系8、およびズームレンズ71の作用を利用することにより、光軸AXを中心とする円環状の領域において、輪帯状の二次光源を構成する各面光源の位置、形状および大きさを適宜変更することができる。

【0102】また、第3実施形態の輪帯照明においても第1実施形態と同様に、複数の輪帯照明用回折光学素子4bを選択的に用いるとともに、第1V溝アキシコン系7、第2V溝アキシコン系8、およびズームレンズ71の作用を利用することにより、輪帯状の二次光源の全体的な大きさおよび形状（輪帯比）、あるいは輪帯状の二次光源から派生的に得られる2極状の二次光源または4極状の二次光源を構成する各面光源の位置、形状および大きさを適宜変更することができる。

【0103】さらに、第3実施形態の円形照明においても第1実施形態と同様に、複数の円形照明用回折光学素子4cを選択的に用いるとともに、第1V溝アキシコン系7、第2V溝アキシコン系8、およびズームレンズ71の作用を利用することにより、円形状の二次光源の全体的な大きさ、あるいは円形状の二次光源から派生的に得られる2極状の二次光源または4極状の二次光源を構成する各面光源の位置、形状および大きさを適宜変更することができる。

【0104】なお、図示を省略したが、第2実施形態における波面分割型のオプティカルインテグレータ（マイクロレンズアレイ10）に代えて、内面反射型のオプティカルインテグレータ（ロッド型インテグレータ70）を用いる第4実施形態も可能である。この場合、回折光学素子4とロッド型インテグレータ70との間の光路中に、光源側から順に、ズームレンズ71、第2回折光学素子（またはマイクロレンズアレイ）72、およびインプットレンズ73を配置する点は第3実施形態と同様である。こうして、第4実施形態では、円錐アキシコン系14、V溝アキシコン系15、およびズームレンズ71の作用を利用することにより、第2実施形態と同様に多様な4極照明、輪帯照明、および円形照明を行うことができる。

【0105】以上のように、第1実施形態～第4実施形態において、V溝アキシコン系（7、8または15）の間隔を変化させることにより、二次光源の全体の大きさおよび形状がX方向またはZ方向に変化する。その結果、マスクM上の直交する二方向（X方向およびY方向）で互いに異なる照明条件を実現することができ、ひいてはパターンに方向性があるマスクM上の直交する二方向で最適な照明条件を設定することができる。

【0106】なお、一対のV溝アキシコン系7および8だけを備えた第1実施形態および第3実施形態は、メモリー（DRAMなど）のリソグラフィー工程に特に好適

である。また、円錐アキシコン系14と1つのV溝アキシコン系15とだけを備えた第2実施形態および第4実施形態は、ロジックデバイス（MPUなど）のリソグラフィー工程に特に好適である。さらに、円錐アキシコン系と一対のV溝アキシコン系とを備えた変形例も可能であり、この変形例は半導体デバイスを含む一般的なマイクロデバイスのリソグラフィー工程に好適である。

【0107】次に、各実施形態における本発明の特徴的な構成および作用についてさらに詳細に説明する。まず、第1実施形態（第3実施形態でも同様）では、第1V溝アキシコン系7（第1アキシコン系）は、光源側から順に、光軸AXに沿って移動可能に構成された第1プリズム部材7aと、光軸AXに沿って固定された第2プリズム部材7bとから構成されている。また、第2V溝アキシコン系8（第2アキシコン系）は、光源側から順に、光軸AXに沿って固定された第1プリズム部材8aと、光軸AXに沿って移動可能に構成された第2プリズム部材8bとから構成されている。

【0108】このように、第1実施形態では、第1V溝アキシコン系7および第2V溝アキシコン系8を構成する4つのプリズム部材（7a、7b、8a、8b）のうち、外側に配置された2つのプリズム部材（7a、8b）が光軸AXに沿って移動可能に構成され、内側に配置された2つのプリズム部材（7b、8a）が光軸AXに沿って固定されている。その結果、第1実施形態では、第1プリズム部材7aを光軸AXに沿って移動させるための第1移動機構（不図示）と、第2プリズム部材8bを光軸AXに沿って移動させるための第2移動機構（不図示）との間隔が十分に大きく確保されるので、移動機構同士の機械的な干渉を確実に回避することができ、ひいてはコンパクトな全体構成を実現することができる。

【0109】また、第2実施形態（第4実施形態でも同様）においても、円錐アキシコン系14（第1アキシコン系）は、光源側から順に、光軸AXに沿って移動可能に構成された第1プリズム部材14aと、光軸AXに沿って固定された第2プリズム部材14bとから構成されている。また、V溝アキシコン系15（第2アキシコン系）は、光源側から順に、光軸AXに沿って固定された第1プリズム部材15aと、光軸AXに沿って移動可能に構成された第2プリズム部材15bとから構成されている。

【0110】このように、第2実施形態では、円錐アキシコン系14およびV溝アキシコン系15を構成する4つのプリズム部材（14a、14b、15a、15b）のうち、外側に配置された2つのプリズム部材（14a、15b）が光軸AXに沿って移動可能に構成され、内側に配置された2つのプリズム部材（14b、15a）が光軸AXに沿って固定されている。その結果、第2実施形態においても、第1プリズム部材14aを光軸

AXに沿って移動させるための第1移動機構（不図示）と、第2プリズム部材15bを光軸AXに沿って移動させるための第2移動機構（不図示）との間隔が十分に大きく確保されるので、移動機構同士の機械的な干渉を確実に回避することができ、ひいてはコンパクトな全体構成を実現することができる。

【0111】なお、第1実施形態では、図15に示すように、第1V溝アキシコン系7および第2V溝アキシコン系8を構成する4つのプリズム部材（7a、7b、8a、8b）のうち、光軸AXに沿って固定された内側の2つのプリズム部材（7b、8a）を一体的に1つのプリズム部材7a8bとして形成することが好ましい。この構成により、第1V溝アキシコン系7および第2V溝アキシコン系8における光の透過率を向上させるとともに、プリズム部材の製造誤差および位置決め誤差を抑えることができ、ひいては高精度で高性能なアキシコン系を実現することができる。同様に、図示を省略したが、第2実施形態における円錐アキシコン系14およびV溝アキシコン系15を構成する4つのプリズム部材（14a、14b、15a、15b）のうち、光軸AXに沿って固定された内側の2つのプリズム部材（14b、15a）を一体的に1つのプリズム部材として形成することが好ましい。

【0112】図16は、円錐アキシコン系およびV溝アキシコン系の一般的な光学作用を説明する図である。また、図17は、円錐アキシコン系の円錐状屈折面の頂点に対応して形成される円形状の影領域およびV溝アキシコン系のV字状屈折面の稜線に対応して形成される直線状の影領域を示す図である。図16を参照すると、光軸AXに対して平行に円錐アキシコン系またはV溝アキシコン系の第1プリズム部材に入射した光線は、その屈折作用により光軸AXに対して角度 α をなして光軸AXから離れる方向に射出され、第2プリズム部材に入射する。

【0113】第2プリズム部材に入射した光線は、その屈折作用を受けた後、光軸AXに対して平行に射出される。このとき、第2プリズム部材から光軸AXに対して平行に射出される光線の光軸AXからの高さ h_2 と、光軸AXに対して平行に第1プリズム部材へ入射する光線の光軸AXからの高さ h_1 との差は Δh （ $=h_2-h_1$ ）となる。角度 α （単位：度）は、次の式（1）で表される。

$$\begin{aligned} \alpha &= \sin^{-1} \{ n \times \sin(90 - \theta) \} + \theta - 90 \\ &= \sin^{-1} (n \times \cos \theta) + \theta - 90 \end{aligned} \quad (1)$$

【0114】ここで、 n は、アキシコン系の第1プリズム部材および第2プリズム部材を形成する光学材料の露光光に対する屈折率である。なお、各実施形態において光源1としてArFエキシマレーザー光源（波長193nm）を用いる場合、さらに一般的には例えば200nm

m以下の波長を有する光を供給する光源を用いる場合、螢石（ CaF_2 ）を用いて各アキシコン系（7、8、14、15）を形成することにより、レーザー光に対する耐久性を向上させることができる。

【0115】一方、 Δh は、次の式（2）で表される。 $\Delta h = A \times L$ （2）

ただし、

$$A = (\tan \alpha \times \tan \theta) / (\tan \theta - \tan \alpha)$$

【0116】ここで、 L は、各アキシコン系における第1プリズム部材の屈折面と第2プリズム部材の屈折面との光軸AXに沿った間隔（図16を参照）である。さらに、 2θ は、円錐アキシコン系における円錐状屈折面の頂角またはV溝アキシコン系におけるV字状屈折面の交差角である。

【0117】ところで、第1実施形態の円形照明において、第1V溝アキシコン系7の第1プリズム部材7aの屈折面と第2プリズム部材7bの屈折面との間隔および第2V溝アキシコン系8の第1プリズム部材8aの屈折面と第2プリズム部材8bの屈折面との間隔がともに所定の間隔に設定された場合、マイクロレンズアレイ10の後側焦点面に形成される円形状の二次光源には、図17(a)に示すように、第1V溝アキシコン系7および第2V溝アキシコン系8のV字状屈折面の稜線に対応して十字状の影領域（図中、空白領域で示す）が形成される。

【0118】また、第2実施形態の円形照明において、円錐アキシコン系14の第1プリズム部材14aの屈折面と第2プリズム部材14bの屈折面との間隔が所定の間隔に設定された場合、マイクロレンズアレイ10の後側焦点面に形成される円形状の二次光源には、図17(b)に示すように、円錐アキシコン系14の円錐状屈折面の頂点に対応して円形状の影領域（図中、空白領域で示す）が形成される。

【0119】この場合、マイクロレンズアレイ10の後側焦点面に形成される円形状の二次光源の直径 D_1 は、次の式（3）で表される。また、十字状の影領域を構成する直線状の影領域の幅 D_2 および円形状の影領域の直径 D_2 は、次の式（4）で表される。

$$\begin{aligned} D_1 &= 2 \times f_3 \times (f_1 \times \sin \phi_{\max}) / f_2 \quad (3) \\ D_2 &= 2 \times \Delta h \times f_3 / f_2 \end{aligned}$$

$$= 2 \times A \times L \times f_3 / f_2 \quad (4)$$

【0120】ここで、 ϕ_{\max} は、光束変換素子としての回折光学素子4の最大回折角である。また、 f_1 は、アフォーカルレンズ（第1光学系）5の前側レンズ群（第1レンズ群）5aの焦点距離である。さらに、 f_2 は、アフォーカルレンズ5の後側レンズ群（第2レンズ群）5bの焦点距離である。また、 f_3 は、ズームレンズ（第2光学系）9の焦点距離である。

【0121】式（4）を参照すると、第1プリズム部材

の屈折面と第2プリズム部材の屈折面との間隔Lを零にすることにより、すなわち第1プリズム部材の屈折面と第2プリズム部材の屈折面とを当接させることにより、十字状の影領域や円形状の影領域の発生を回避できることがわかる。しかしながら、円錐アキシコン系14の第1プリズム部材14aの円錐状の凹状屈折面の頂点部分およびV溝アキシコン系(7, 8)の第1プリズム部材のV字状の凹状屈折面の稜線部分を所望の面精度で理想形状に形成することは困難である。また、第1プリズム部材の屈折面と第2プリズム部材の屈折面とを当接させると、円錐アキシコン系14の第2プリズム部材14bの円錐状の凸状屈折面の頂点部分およびV溝アキシコン系(7, 8)の第2プリズム部材のV字状の凸状屈折面の稜線部分が破損し易い。

【0122】そこで、実際には、第1プリズム部材の屈折面と第2プリズム部材の屈折面とを当接させることは不可能であり、第1プリズム部材の屈折面と第2プリズム部材の屈折面との間隔Lが所定の値よりも小さくすることはできない。その結果、円形状の二次光源において

$$2 \times A \times L \times f_3 / f_2 \leq 2 \times f_3 \times (f_1 \times \sin \phi_{\max}) / (10 \times f_2) \quad (5)$$

$$A \times L \leq (f_1 \times \sin \phi_{\max}) / 10 \quad (6)$$

【0124】上述したように、V溝アキシコン系(7, 8)の第1プリズム部材のV字状の凹状屈折面の稜線部分を所望の面精度で理想形状に形成することは困難である。その結果、第1プリズム部材の屈折面と第2プリズム部材の屈折面との間隔Lを所定の値よりも小さくすることができず、円形状の二次光源において十字状の影領域が発生する。そこで、第1プリズム部材の屈折面と第2プリズム部材の屈折面との最小間隔をできるだけ小さくし、ひいては円形状の二次光源において形成される十字状の影領域の幅D2をできるだけ小さくするには、図18に示すように、光軸AXと屈折面の稜線とを含む面(図中、光軸AXを含んで紙面に垂直な面)に沿って分割された2つのプリズム部材81および82によって第1プリズム83を構成するのが有効である。

【0125】この場合、たとえば分割プリズム部材81の光軸AXに沿った面81aに対向する外側端面81bに保持機構の固定支持面84を当接させるとともに、分割プリズム部材82の光軸AXに沿った面82aに対向する外側端面82bに保持機構の可動支持面85を当接させながら矢印Fに沿って付勢する。こうして、分割プリズム部材81の面81aと分割プリズム部材82の面82aとは、接着剤などを介することなく、いわゆる面タッチ状態で姿勢保持される。

【0126】ところで、円錐アキシコン系における円錐状屈折面の頂角 2θ (単位:度)またはV溝アキシコン系におけるV字状屈折面の交差角 2θ は、理論的には90度よりも大きく且つ180度よりも小さいが、実際には以下の条件式(7)を満足することが好ましい。

$$120 < 2\theta < 160 \quad (7)$$

十字状の影領域や円形状の影領域の発生が不可避である。この場合、特に小 σ の円形照明を行うと、マイクロレンズアレイ10の後側焦点面に形成される円形状の二次光源の直径D1が小さくなるので、十字状の影領域や円形状の影領域が二次光源を占める割合が大きくなり、ひいては照明瞳における光強度分布に与える影響が大きくなる。したがって、十字状の影領域の幅D2や円形状の影領域の直径D2をできるだけ小さく抑えることが必要である。

【0123】具体的には、十字状の影領域や円形状の影領域の影響を実質的に受けることなく照明瞳において所望の光強度分布を得るには、十字状の影領域の幅D2や円形状の影領域の直径D2をマイクロレンズアレイ10の後側焦点面に形成される円形状の二次光源の直径D1の1/10以下に抑えること、すなわち $D1 \leq D2/10$ の条件を満足することが必要である。 $D1 \leq D2/10$ の条件は、具体的には式(3)および(4)を参照すると、次の式(5)で表され、最終的には式(6)で表される。

【0127】条件式(7)の下限値を下回ると、同じ Δh を発生させるのに必要な間隔Lが小さ過ぎて、 Δh の高精度な制御が困難になるので不都合である。また、条件式(7)の上限値を上回ると、同じ Δh を発生させるのに必要な間隔Lが大き過ぎて、アキシコン系の大型化を、ひいては装置の大型化を招くので不都合である。このように、アキシコン系における頂角 2θ または交差角 2θ について制約があり、且つアキシコン系における屈折面の間隔Lについても制約がある。したがって、特に4極照明において、V溝アキシコン系による各面光源の移動比率(すなわち移動先の面光源の座標位置に対する移動元の面光源の座標位置)には光学設計上の制約があり、各面光源の移動範囲には制限がある。

【0128】そこで、第1実施形態では、4つの面光源の中心点を結んで形成される四角形が細長い長方形になるような4極状の二次光源を初期的に形成し、第1V溝アキシコン系7および第2V溝アキシコン系8の作用により、さらに多様な4極照明を行うことができる。具体的には、第1実施形態では、図5に示すように、第1の4極照明用回折光学素子により、4つの面光源の中心点を結んで形成される四角形が正方形になるような4極状の二次光源を初期的に形成し、第1V溝アキシコン系7および第2V溝アキシコン系8の作用により、各面光源をその形状および大きさを維持したままZ方向およびX方向に沿って光軸AXを挟んで対称に移動させる。

【0129】これに加えて、第1実施形態では、図19(a)に示すように、第2の4極照明用回折光学素子により、4つの面光源の中心点を結んで形成される四角形がX方向に沿って細長い長方形になるような4極状の二

次光源を形成する。また、第1実施形態では、図19

(b)に示すように、第3の4極照明用回折光学素子により、4つの面光源の中心点を結んで形成される四角形がZ方向に沿って細長い長方形になるような4極状の二次光源を形成する。そして、第1V溝アキシコン系7および第2V溝アキシコン系8の作用により、図中矢印で示すように、各面光源をその形状および大きさを維持したままZ方向およびX方向に沿って光軸AXを挟んで対称に移動させる。

【0130】上述の各実施形態にかかる露光装置では、照明光学装置によってマスク（レチクル）を照明し（照明工程）、投影光学系を用いてマスクに形成された転写用のパターンを感光性基板に露光する（露光工程）ことにより、マイクロデバイス（半導体素子、撮像素子、液晶表示素子、薄膜磁気ヘッド等）を製造することができる。以下、上述の各実施形態の露光装置を用いて感光性基板としてのウェハ等に所定の回路パターンを形成することによって、マイクロデバイスとしての半導体デバイスを得る際の手法の一例につき図20のフローチャートを参照して説明する。

【0131】まず、図20のステップ301において、1ロットのウェハ上に金属膜が蒸着される。次のステップ302において、その1ロットのウェハ上の金属膜上にフォトリソが塗布される。その後、ステップ303において、上述の各実施形態の露光装置を用いて、マスク上のパターンの像がその投影光学系を介して、その1ロットのウェハ上の各ショット領域に順次露光転写される。その後、ステップ304において、その1ロットのウェハ上のフォトリソの現像が行われた後、ステップ305において、その1ロットのウェハ上でレジストパターンをマスクとしてエッチングを行うことによって、マスク上のパターンに対応する回路パターンが、各ウェハ上の各ショット領域に形成される。その後、更に上のレイヤの回路パターンの形成等を行うことによって、半導体素子等のデバイスが製造される。上述の半導体デバイス製造方法によれば、極めて微細な回路パターンを有する半導体デバイスをスループット良く得ることができる。

【0132】また、上述の各実施形態の露光装置では、プレート（ガラス基板）上に所定のパターン（回路パターン、電極パターン等）を形成することによって、マイクロデバイスとしての液晶表示素子を得ることもできる。以下、図21のフローチャートを参照して、このときの手法の一例につき説明する。図21において、パターン形成工程401では、上述の各実施形態の露光装置を用いてマスクのパターンを感光性基板（レジストが塗布されたガラス基板等）に転写露光する、所謂光リソグラフィ工程が実行される。この光リソグラフィ工程によって、感光性基板には多数の電極等を含む所定パターンが形成される。その後、露光された基板は、現像

工程、エッチング工程、レジスト剥離工程等の各工程を経ることによって、基板上に所定のパターンが形成され、次のカラーフィルター形成工程402へ移行する。

【0133】次に、カラーフィルター形成工程402では、R（Red）、G（Green）、B（Blue）に対応した3つのドットの組がマトリックス状に多数配列されたり、またはR、G、Bの3本のストライプのフィルターの組を複数水平走査線方向に配列したカラーフィルターを形成する。そして、カラーフィルター形成工程402の後に、セル組み立て工程403が実行される。セル組み立て工程403では、パターン形成工程401にて得られた所定パターンを有する基板、およびカラーフィルター形成工程402にて得られたカラーフィルター等を用いて液晶パネル（液晶セル）を組み立てる。セル組み立て工程403では、例えば、パターン形成工程401にて得られた所定パターンを有する基板とカラーフィルター形成工程402にて得られたカラーフィルターとの間に液晶を注入して、液晶パネル（液晶セル）を製造する。

【0134】その後、モジュール組み立て工程404にて、組み立てられた液晶パネル（液晶セル）の表示動作を行わせる電気回路、バックライト等の各部品を取り付けて液晶表示素子として完成させる。上述の液晶表示素子の製造方法によれば、極めて微細な回路パターンを有する液晶表示素子をスループット良く得ることができる。

【0135】なお、上述の各実施形態では、変形照明において4極状や輪帯状の二次光源を例示的に形成しているが、光軸に対して偏心した2つの面光源からなる2極状の二次光源や、光軸に対して偏心した8つの面光源からなる8極状の二次光源のような、いわゆる複数極状あるいは多極状の二次光源を形成することもできる。

【0136】また、上述の各実施形態では、照明光学装置を備えた投影露光装置を例にとって本発明を説明したが、マスク以外の被照射面を照明するための一般的な照明光学装置に本発明を適用することができることは明らかである。

【0137】

【発明の効果】以上説明したように、本発明の照明光学装置では、アキシコン系の作用により4極状や輪帯状の二次光源を適宜変化させて、被照射面上の直交する二方向で互いに異なる照明条件を実現することができる。したがって、被照射面上の直交する二方向で互いに異なる照明条件を実現することのできる本発明の照明光学装置を組み込んだ露光装置および露光方法では、パターンに方向性があるマスク上の直交する二方向で最適な照明条件を設定することができ、良好な照明条件のもとで良好なマイクロデバイスを製造することができる。

【図面の簡単な説明】

【図1】本発明の第1実施形態にかかる照明光学装置を備えた露光装置の構成を概略的に示す図である。

【図2】マイクロレンズアレイの後側焦点面に形成される4極状の二次光源の構成を概略的に示す図である。

【図3】第1実施形態においてアフォーカルレンズの前側レンズ群と後側レンズ群との間の光路中に配置された2つのアキシコン系の構成を概略的に示す斜視図である。

【図4】第1実施形態の4極照明において形成される二次光源に対するズームレンズの作用を説明する図である。

【図5】第1実施形態の4極照明において形成される二次光源に対する第1V溝アキシコン系および第2V溝アキシコン系の作用を説明する図である。

【図6】第1実施形態の輪帯照明において形成される二次光源に対するズームレンズの作用を説明する図である。

【図7】第1実施形態の輪帯照明において形成される二次光源に対する第1V溝アキシコン系および第2V溝アキシコン系の作用を説明する図である。

【図8】第1実施形態の円形照明において形成される二次光源に対する第1V溝アキシコン系および第2V溝アキシコン系の作用を説明する図である。

【図9】本発明の第2実施形態にかかる照明光学装置を備えた露光装置の構成を概略的に示す図である。第2実施形態においてアフォーカルレンズの光路中に配置された円錐アキシコン系およびV溝アキシコン系の構成を概略的に示す斜視図である。

【図10】第2実施形態においてアフォーカルレンズの光路中に配置された円錐アキシコン系およびV溝アキシコン系の構成を概略的に示す斜視図である。

【図11】第2実施形態の4極照明において形成される二次光源に対する円錐アキシコン系の作用を説明する図である。

【図12】第2実施形態の輪帯照明において形成される二次光源に対する円錐アキシコン系の作用を説明する図である。

【図13】本発明の第3実施形態にかかる照明光学装置を備えた露光装置の構成を概略的に示す図である。

【図14】第3実施形態における第2回折光学素子の作用を説明する図である。

【図15】2つのアキシコン系を構成する4つのプリズ

ム部材のうち、光軸に沿って固定された内側の2つのプリズム部材を一体的に形成した構成を概略的に示す斜視図である。

【図16】円錐アキシコン系およびV溝アキシコン系の一般的な光学作用を説明する図である。

【図17】円錐アキシコン系の円錐状屈折面の頂点に対応して形成される円形状の影領域およびV溝アキシコン系のV字状屈折面の稜線に対応して形成される直線状の影領域を示す図である。

【図18】稜線に沿って分割された2つのプリズム部材でV溝アキシコン系の第1プリズムを構成した例を示す図である。

【図19】4つの面光源の中心点を結んで形成される四角形が細長い長方形になるような4極状の二次光源を初期的に形成する例を示す図である。

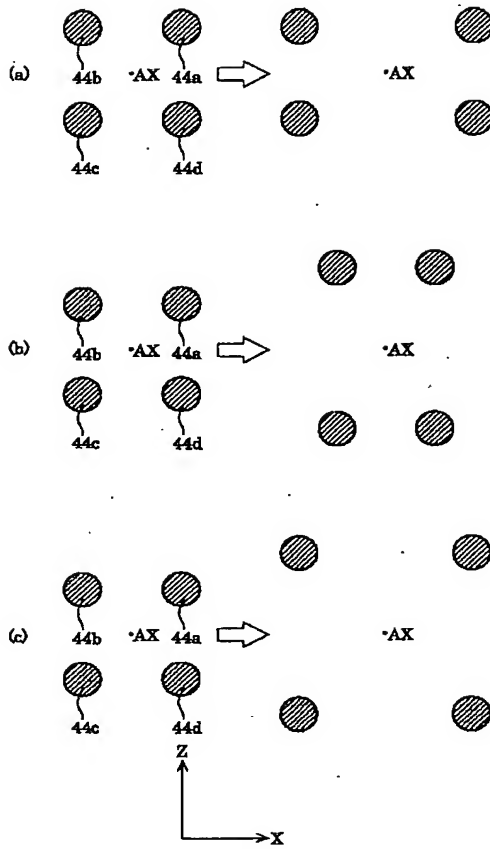
【図20】マイクロデバイスとしての半導体デバイスを得る際の手法のフローチャートである。

【図21】マイクロデバイスとしての液晶表示素子を得る際の手法のフローチャートである。

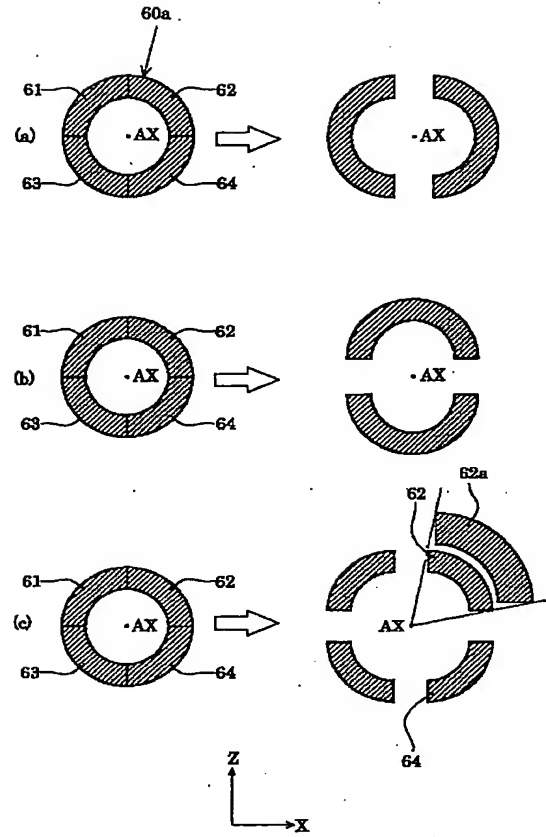
【符号の説明】

- 1 光源
- 4 回折光学素子
- 5 アフォーカルレンズ
- 7, 8, 16 V溝アキシコン系
- 9 ズームレンズ
- 10 マイクロレンズアレイ
- 11 コンデンサー光学系
- 12 マスクブラインド
- 13 結像光学系
- 14 円錐アキシコン系
- 70 ロッド型インテグレータ
- 71 ズームレンズ
- 73 インพุットレンズ
- M マスク
- PL 投影光学系
- W ウェハ
- 20 入力手段
- 21 制御系
- 22~29 駆動系

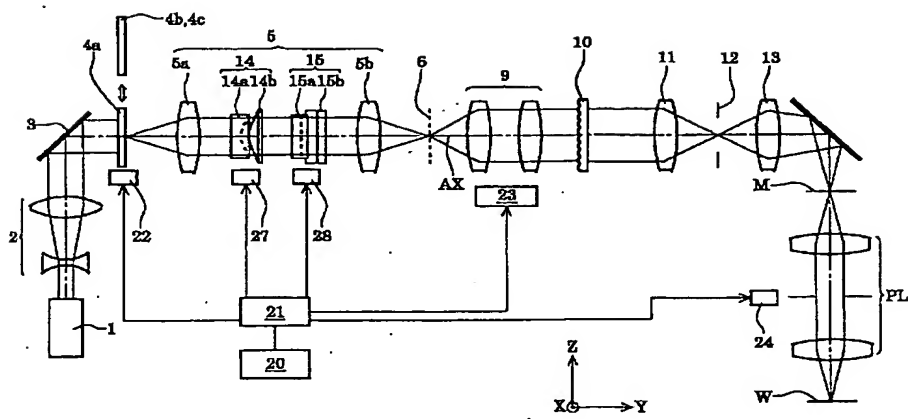
【図5】



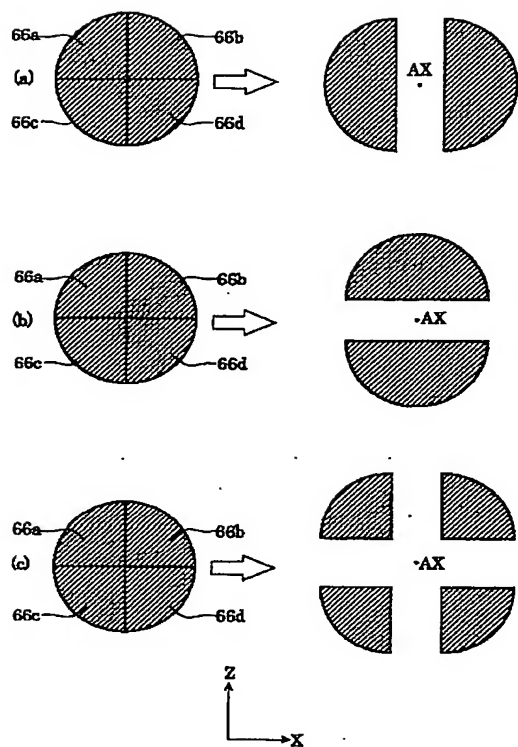
【図7】



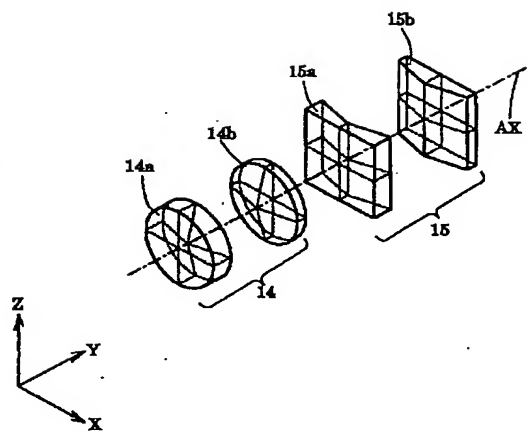
【図9】



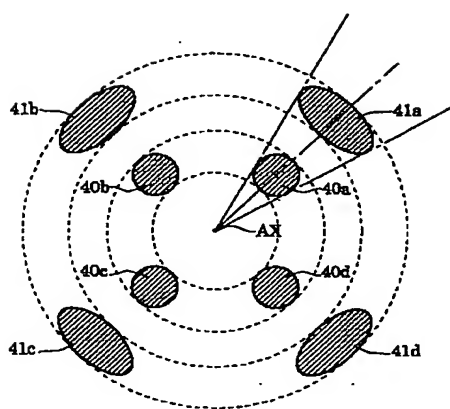
【図 8】



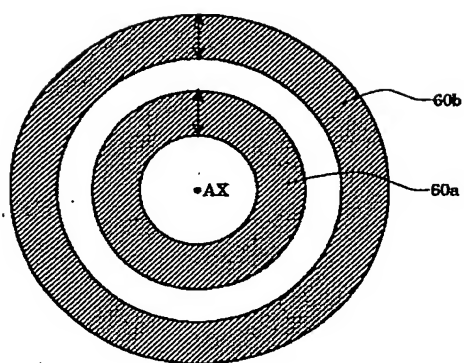
【図 10】



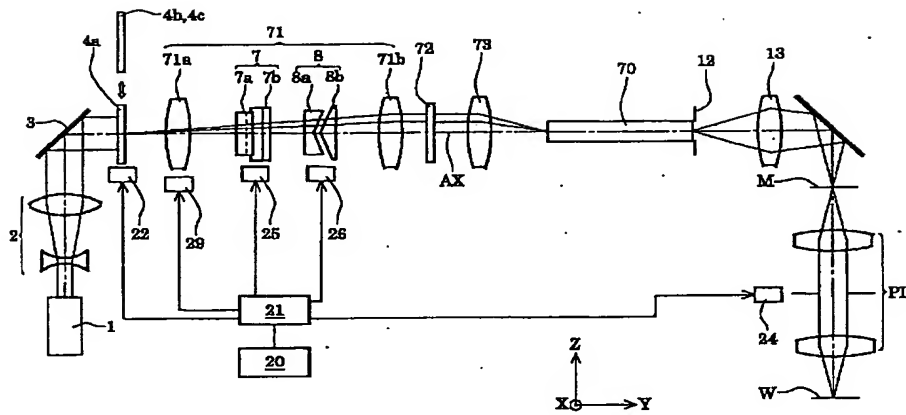
【図 11】



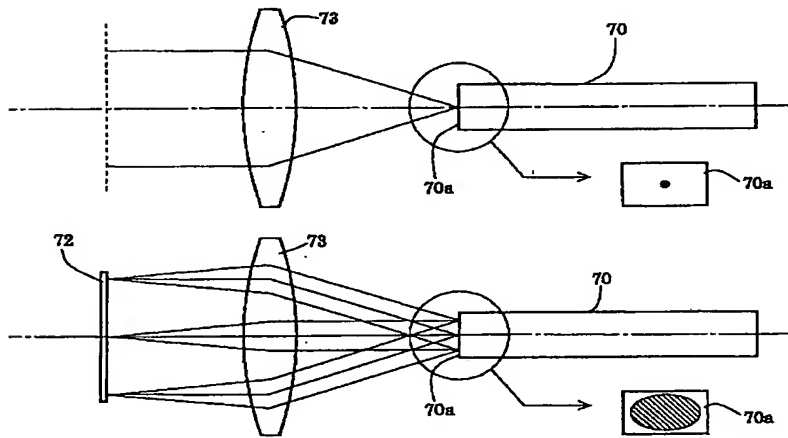
【図 12】



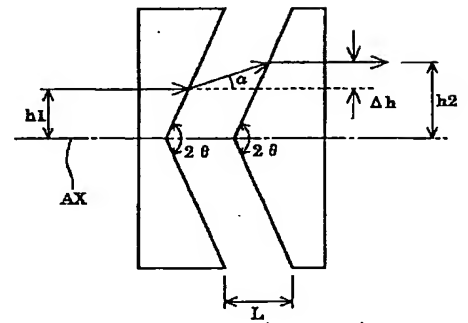
【図13】



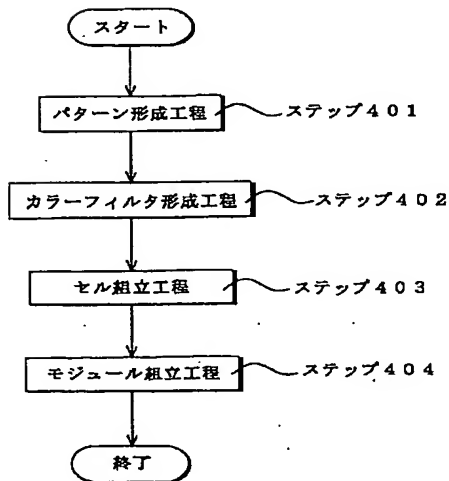
【図14】



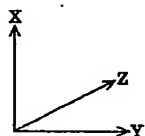
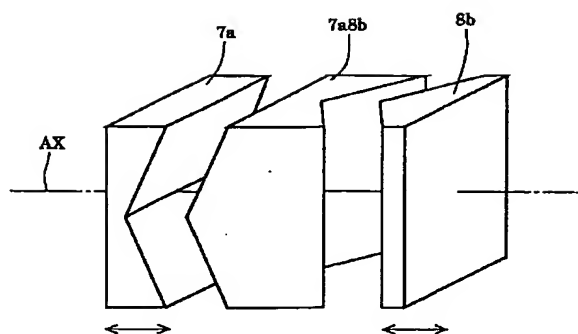
【図16】



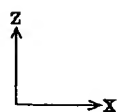
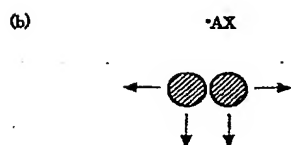
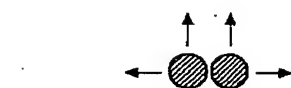
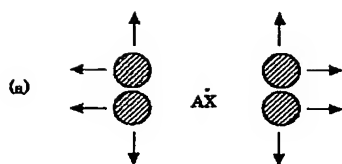
【図21】



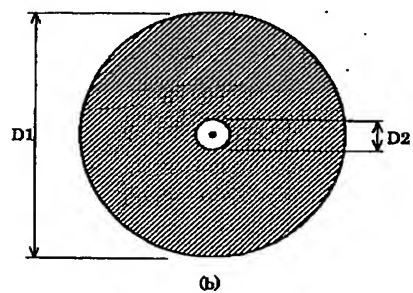
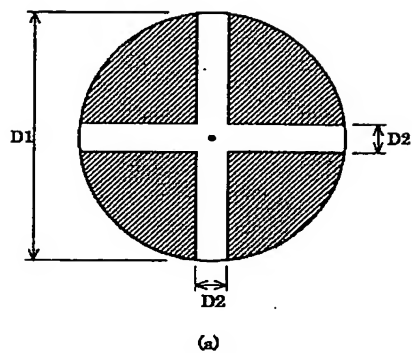
【図15】



【図19】



【図17】



【図20】

